

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Analýza výsledků monitorování**  
**distribučních sítí**

**Results Analysis of Distribution**  
**Networks Monitoring**

2012

Petr Kolibáč

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Petr Kolibáč**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Analýza výsledků monitorování distribučních sítí  
Results Analysis of Distribution Networks Monitoring

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky elektrických měření
2. Kvalita elektrické energie z pohledu norem ČSN
3. Technické prostředky pro monitorování kvality el. energie
4. Analýza dat

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Drechsler, R.: Měření elektrické energie, SNTL, Praha, 1966
2. Heřman, J a kol.: Příručka silnoproudé elektrotechniky, SNTL, Praha, 1984
3. Normy ČSN
4. Další literatura podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 4.5.2012

Podpis: *Petr Kolibáč*

Děkuji doc. Ing. Petru Krejčímu Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za cenné rady a připomínky.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou kvality elektrické energie. První část je věnována teoretickému rozboru elektrických měření. Zde jsou zmíněny základní pojmy a měřicí metody. Následuje seznámení s chybami a nejistotami měření. V popisu jsou dále zahrnuty měřicí převodníky, virtuální měřicí přístroje, měřicí přístroje s rozhraním a A/D převodníky. Další část je vyhrazena pro popis kvality elektrické energie z pohledu norem ČSN. Je zde uvedena norma ČSN EN 50160 a její požadavky na jednotlivé parametry. Pro porovnání s touto normou je uvedeno i hodnocení harmonických napětí z pohledu norem ČSN EN 61000-2-2 a ČSN EN 61000-2-4. Dále jsou popsány zařízení pro monitorování kvality elektrické energie od různých výrobců včetně dvou moderních elektroměrů. V praktické části je provedena samotná analýza dat, kde jsou vyhodnocena jednotlivá lichá harmonická napětí až do 25. řádu, THD, flíkr a nesymetrie.

## **Klíčová slova**

kvalita elektrické energie, harmonická napětí, celkový činitel harmonického zkreslení, flíkr, nesymetrie, elektrická měření, normy ČSN, analyzátor kvality napětí, analýza dat

## **Abstract**

This thesis deals with electrical power quality issues. The first part is dedicated to the theoretical analysis of electrical measurements. There are mentioned the basic terms and measurement methods. It is followed by the measurement errors and uncertainties. There are also described the measuring converters, virtual measuring instruments, measuring instruments with interface and A/D converters. Next part presents the description of electrical power quality in perspective of standards ČSN. There is presented the standard ČSN EN 50160 and its requirements for individual parameters. In order to compare this standard, an assessment of harmonic voltages in perspective of standards ČSN EN 61000-2-2 and ČSN EN 61000-2-4 was presented. Next, there were described various makers' devices for monitoring electrical power quality including two modern electric meters. In the practical part there is the actual data analysis fulfilled; there are evaluated individual odd harmonic voltages up to the 25<sup>th</sup> order, THD, flicker and unbalance.

## **Key Words**

electrical power quality, harmonic voltages, total harmonic distortion, flicker, unbalance, electrical measurements, standards ČSN, voltage quality analyzer, data analysis

# Obsah

Úvod.....	1
1 Teoretický rozbor elektrických měření .....	2
1.1 Základní pojmy .....	2
1.2 Měřicí metody.....	3
1.3 Chyby měření .....	3
1.3.1 Chyby měření elektromechanických přístrojů.....	5
1.3.2 Chyby měření číslicových přístrojů .....	5
1.3.3 Chyby nepřímých měření .....	6
1.4 Nejistoty měření .....	7
1.4.1 Standardní nejistoty .....	8
1.4.2 Výpočet standardních nejistot .....	8
1.4.3 Nejistoty nepřímých měření .....	9
1.5 Měřicí převodníky .....	9
1.5.1 Bočníky .....	10
1.5.2 Předřadníky .....	11
1.5.3 Děliče napětí.....	11
1.5.4 Měřicí transformátory.....	12
1.5.4.1 Měřicí transformátory proudu.....	12
1.5.4.2 Měřicí transformátory napětí .....	13
1.6 Virtuální měřicí přístroje .....	14
1.6.1 Měřicí přístroje s rozhraním .....	14
1.6.1.1 Rozhraní RS 232.....	15
1.6.1.2 Rozhraní GPIB .....	15
1.6.1.3 Rozhraní USB.....	15
1.6.1.4 Rozhraní Ethernet .....	16
1.6.2 Virtuální instrumentace .....	16
1.6.3 VXI Sběrnice.....	16
1.7 A/D převodníky .....	17
1.7.1 Typy A/D převodníků .....	18
1.7.1.1 Paralelní A/D převodník.....	19
1.7.1.2 A/D převodník s postupnou aproximací .....	19
1.7.1.3 A/D převodník s dvojí integrací .....	20
1.7.1.4 Kompenzační A/D převodník se schodovitým napětím .....	21
2 Kvalita elektrické energie z pohledu norem.....	22
2.1 Norma ČSN EN 50160 .....	22
2.1.1 Kmitočet sítě .....	23
2.1.2 Odchyšky napájecího napětí .....	23
2.1.3 Rychlé změny napětí .....	23
2.1.4 Míra vjemu flikru .....	24
2.1.5 Nesymetrie napájecího napětí .....	24

2.1.6	Harmonická napětí .....	25
2.1.7	Meziharmonická napětí .....	26
2.1.8	Úrovně napětí signálů v napájecím napětí.....	26
2.1.9	Přerušení napájecího napětí.....	27
2.1.10	Poklesy a dočasná zvýšení napájecího napětí .....	27
2.2	Harmonická napětí z pohledu ČSN EN 61000-2-2 .....	27
2.3	Harmonická napětí z pohledu ČSN EN 61000-2-4 .....	29
3	Technické prostředky pro monitorování kvality elektrické energie.....	31
3.1	Požadavky na přístroje pro měření kvality elektrické energie.....	31
3.2	Systém BK-ELCOM pro monitorování a analýzu kvality elektrické energie .....	32
3.2.1	Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA400 .....	32
3.2.2	Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA500.xx .....	33
3.2.3	Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA560 .....	34
3.2.4	Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA600 .....	35
3.3	Analyzátor Fluke 435 řady II.....	35
3.4	Analyzátor Fluke 1760 Topas.....	36
3.5	Analyzátor C.A 8335 QUALISTAR PLUS.....	37
3.6	Analyzátor C.A 8352 .....	38
3.7	Univerzální monitor MEgA MEg40 .....	38
3.8	Elektroměr Landis+Gyr E850 ZMQ200.....	39
3.9	Elektroměr Itron ACE8000.....	40
4	Analýza dat .....	41
4.1	Analýza dat z místa 1.....	41
4.2	Analýza dat z místa 2.....	44
4.3	Analýza dat z místa 3.....	45
4.4	Analýza dat z místa 4.....	46
4.5	Analýza dat z místa 5.....	47
5	Závěr .....	48
	Literatura.....	50
	Seznam obrázků .....	52
	Seznam tabulek .....	53
	Seznam příloh .....	54

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$A/D$	analogovo – digitální	
ČSN	česká technická norma	
ENOB	efektivní počet bitů	
HDO	hromadné dálkové ovládání	
IPC	napájecí bod uvnitř závodu	
MTI	měřicí transformátor proudu	
MTU	měřicí transformátor napětí	
$N$	nesymetrie	[%]
$P_{lt}$	dlouhodobá míra vjemu flikru	[-]
$P_{st}$	krátkodobá míra vjemu flikru	[-]
PC	osobní počítač	
PCC	společný napájecí bod	
PPDS	pravidla provozování distribučních soustav	
PPPS	pravidla provozování přenosové soustavy	
SNR	kvantizační šum	[dB]
THD	celkový činitel harmonického zkreslení	[%]
TP	třída přesnosti	
$U_c$	napájecí napětí	[V]
$U_h$	harmonické napětí	[%]
$U_n$	jmenovité napětí	[V]
$U_{ref}$	referenční napětí	[V]
$U_{vst}$	vstupní napětí	[V]
$X_M$	naměřená hodnota	
$X_R$	nejvyšší hodnota měřicího rozsahu	
$X_S$	pravá hodnota	
h	řád harmonické	
nn	nízké napětí	
vn	vysoké napětí	
vvn	velmi vysoké napětí	
$u_A$	standardní nejistota typu A	
$u_B$	standardní nejistota typu B	
$u_C$	kombinovaná standardní nejistota	
$u_i$	napětí za integrátorem	[V]
$\varepsilon_I$	chyba proudu	[%]
$\varepsilon_U$	chyba napětí	[%]
$\sigma$	směrodatná odchylka	

Další použité symboly a zkratky jsou vysvětleny přímo v textu.



## Úvod

Život bez elektřiny bychom si v dnešní době asi jen stěží dokázali představit. Elektrická energie bývá právem označována za nejušlechtlejší formu energie. Lze ji vyrábět z různých forem energie, hospodárně přenášet na velké vzdálenosti a přeměňovat na jiné formy energie jako je teplo, světlo, mechanická energie atd. Prakticky jediným nedostatkem jsou omezené možnosti její akumulace. Elektřinu popisujeme různými kvalitativními parametry, které ovlivňují její užitečnost. Distributor má povinnost dodat uživateli elektrickou energii v požadované kvalitě. Nedodržení parametrů kvality elektřiny může mít za následek vznik velkých problémů a škod. V ideálním případě by mělo dodávané napájecí napětí být souměrné s konstantním kmitočtem, dokonale sinusovým průběhem a konstantní amplitudou. Ve skutečnosti nelze těchto parametrů zcela dosáhnout, protože existuje mnoho faktorů, které je ovlivňují. Normy proto předepisují mezní limity, ve kterých by se měly jednotlivé parametry pohybovat. Aby bylo možné reagovat na měnící se podmínky, musíme elektrickou energii měřit a získané hodnoty správně vyhodnocovat.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou kvality elektrické energie. První kapitola je věnována teoretickému rozboru elektrických měření. Zde jsou zmíněny základní pojmy a měřicí metody. Následuje seznámení s chybami a nejistotami měření. V popisu jsou dále zahrnuty měřicí převodníky, virtuální měřicí přístroje a měřicí přístroje s rozhraním. V poslední části této kapitoly jsou popsány A/D převodníky a jejich typy. Druhá kapitola je zaměřena na kvalitu elektrické energie z pohledu norem ČSN. Je zde uvedena norma ČSN EN 50160 a její požadavky na jednotlivé parametry. Pro doplnění jsou zde zmíněny i hodnoty z Pravidel provozování distribučních soustav, která uvádí některé parametry, které u ČSN EN 50160 chybí. Pro porovnání s touto normou je uvedeno i hodnocení harmonických napětí z pohledu norem ČSN EN 61000-2-2 a ČSN EN 61000-2-4. Třetí kapitola je věnována zařízením pro monitorování kvality elektrické energie od různých výrobců včetně dvou moderních elektroměrů. Čtvrtá kapitola je vyhrazena pro samotnou analýzu dat, kde jsou vyhodnocena jednotlivá lichá harmonická napětí až do 25. řádu, THD, flikr a nesymetrie pro pět míst na hladinách nn, vn a vvn ve třech měřených letech.

# 1 Teoretický rozbor elektrických měření

## 1.1 Základní pojmy

*Měření* je souhrn činností jejichž cílem je určení hodnoty měřené veličiny (to znamená vyjádření hodnoty veličiny v jednotkách této veličiny).

*Elektrické měření* je měření elektrických, ale i neelektrických veličin s využitím elektrických měřicích prostředků.

*Měřicí prostředky* se využívají pro měření, patří mezi ně: míry, měřicí přístroje a měřicí převodníky.

*Míra* je měřicí prostředek, který plní funkci reprodukování hodnoty nebo hodnot měřené veličiny.

*Měřicí přístroje* se dělí na analogové a číslicové. U analogového měřicího přístroje je údaj spojitou funkcí měřené veličiny (např. poloha ručky na stupnici). Číslicový měřicí přístroj udává měřenou hodnotu v číslicovém tvaru.

*Měřicí převodník* slouží k transformování vstupní veličiny podle určité zákonitosti na výstupní veličinu.

*Měřicí řetězec* je série měřicích členů, kterými prochází měřený signál.

*Snímač (senzor, čidlo)* je první člen měřicího řetězce, na který bezprostředně působí měřená veličina.

*Přesnost měření* je míra těsnosti, se kterou výsledek měření vyjadřuje pravou hodnotu měřené veličiny. Tuto hodnotu nikdy neznáme, používáme tzv. konvenčně pravou hodnotu, která je získána měřením pomocí přesnějšího přístroje, přesnější metody nebo pomocí metody považované dohodou za referenční.

*Citlivost* měřicího přístroje nebo zařízení je poměr změny výstupní veličiny (údaje přístroje) ke změně vstupní veličiny. Příliš malá citlivosti může způsobit horší přesnost měření. Konstantní citlivost (nezávislou na hodnotě měřené veličiny) mají lineární převodníky.

*Rozlišení (rozlišovací schopnost)* je nejmenší změna měřené veličiny, která způsobí detekovatelnou změnu údaje přístroje (např. dílek nebo polovinu dílku stupnice u analogového přístroje nebo změnu posledního místa číslicového zobrazovače o jedničku u číslicových přístrojů).

*Měřicí rozsah* přístroje nebo převodníku udává meze hodnot, ve kterých se může měnit měřená veličina, aby byla měřena se zaručovanou přesností.

*Ovlivňující veličina* je veličina, která ovlivňuje údaj měřidla, ale není předmětem měření.[1.]

## 1.2 Měřicí metody

Měřicí metoda je definována jako souhrn teoretických poznatků a praktických operací použitých při měření.

Měřicí metody lze rozdělit podle způsobu určení měřené veličiny na:

- přímé měřicí metody*, u kterých se hodnota měřené veličiny získá přímo, bez měření veličin, které jsou funkčně vázány s měřenou veličinou (např. určení hodnoty elektrického proudu pomocí ampérmetru);
- nepřímé měřicí metody*, u kterých se hodnota měřené veličiny získá měřením jiných veličin funkčně vázaných s měřenou veličinou (např. určení hodnoty odporu pomocí voltmetru a ampérmetru).

Podle provedení měření rozlišujeme:

- základní měřicí metodu*, kde se hodnota měřené veličiny stanoví měřením příslušných základních veličin;
- přímou komparační měřicí metodu*, kde je měřená veličina přímo porovnávána s veličinou téhož druhu, jejíž hodnota je známa;
- substituční měřicí metodu*, kde je měřená veličina nahrazována veličinou téhož druhu známé hodnoty, vyhledanou tak, aby údaje vyvolané na indikačním přístroji byly shodné;
- diferenční měřicí metodu*, kde je měřená veličina porovnávána s veličinou téhož druhu nepatrně se lišící hodnoty, měřením se zjišťuje odchylka mezi nimi;
- nulovou měřicí metodu*, kde je měřená hodnota stanovena při rovnováze dosažené nastavením jedné nebo více veličin vázaných s měřenou veličinou známými vztahy. [2.]

## 1.3 Chyby měření

Neexistuje takové měření, kterým by jsme získali správnou hodnotu měřené veličiny, protože každé měření je zatíženo chybou. Pomocí chyb charakterizujeme přesnost měření. Při studiu chyb se snažíme o nalezení celkové chyby, jejích dílčích složek a jejich příčin. Základní podmínkou zvyšování přesnosti měření je analýza chyb.

Chyba měření je odchylka měřené hodnoty od správné hodnoty měřené veličiny. Udává se velikostí a znaménkem. Vyjadřuje se jako absolutní a relativní chyba.

Absolutní chyba ( $\Delta$ ) měřené veličiny  $X$  je

$$\Delta_{(X)} = X_M - X_S \quad (1.1)$$

kde  $X_M$  je naměřená hodnota a  $X_S$  je (konvenčně) pravá hodnota. Absolutní chyba se vyjadřuje v jednotkách měřené veličiny.

Relativní chyba ( $\delta$ ) je bezrozměrné číslo, ale lze ji také vyjádřit v procentech nebo v miliontinách p.p.m.

$$\delta_{(X)} = \frac{\Delta_{(X)}}{X_S} \quad (1.2)$$

$$\delta_{(X)} = \frac{\Delta_{(X)}}{X_S} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.3)$$

$$\delta_{(X)} = \frac{\Delta_{(X)}}{X_S} \cdot 10^6 \quad [\text{ppm}] \quad (1.4)$$

Podle toho jak se chyby projevují při opakovaných měření se dělí na systematické a náhodné.

**Systematická chyba** – je složka chyby měření, která se při opakovaném měření projevuje stále stejně nebo se předvídatelným způsobem mění. Příčiny mohou být známé nebo neznámé. Pokud lze tuto chybu zjistit pomocí jiného (přesnějšího) měření, nebo je-li příčina jejího vzniku známá, můžeme tuto složku chyby odstranit pomocí korekce. Mezi systematické chyby patří:

- *chyby metody* ( $\Delta_M$ ,  $\delta_M$ ): chyby, které jsou způsobeny zjednodušeními při výpočtu měřené veličiny (např. zanedbání vlivu odporu voltmetru na měřené napětí zdroje s nenulovým vnitřním odporem). Tuto chybu je možné korigovat respektováním její hodnoty a znaménka;
- *chyba nuly* nebo *offset*: hodnota výstupní veličiny převodníku nebo údaj přístroje, který je v provozu při nulové hodnotě měřené veličiny. Tato chyba je aditivní a přičítá se ke všem měřením;
- *chyba zesílení*: chyba, která je způsobena např. chybnou hodnotou odporu ve vstupním děliči nebo v předřadném rezistoru voltmetru, absolutní chyba je zde úměrná měřené veličině.

**Náhodná chyba** – je složka chyby měření, která se při opakovaných měřeních nepředvídatelně mění. Tuto chybu pomocí korekcí odstranit nelze. Jedinou možností zpracování těchto chyb je zvýšení počtu měření a výsledky zpracovat statistickými metodami. Tímto způsobem lze získat střední hodnotu opakovaných měření a jejich rozptyl. Mezi příčiny náhodných chyb patří:

- *šumy*;
- *neznámé změny podmínek měření*: teplota, vlhkost, rušivá elektromagnetická pole (V případě, že měříme teplotu okolí a známe teplotní koeficienty měřicího zařízení, je chyba vyvolaná změnou teploty chybou systematickou.);
- *zaokrouhlování výsledků měření*: u analogových měřicích přístrojů provádí zaokrouhlování pozorovatel, číslicové měřicí přístroje provádí zaokrouhlování výsledku samy (u nich se tomuto druhu chyby říká kvantizační šum).

### 1.3.1 Chyby měření elektromechanických přístrojů

Chyba údaje měřicího přístroje ( $\Delta_u$ ,  $\delta_u$ ) je rozdíl údaje přístroje a (konvenčně) pravé hodnoty měřené veličiny. Necharakterizuje přesnost přístroje, protože závisí také na podmínkách měření.

Pro běžné elektromechanické přístroje je přesnost přístroje charakterizovaná normou ČSN 356203. Ta ji vyjadřuje chybou přístroje ( $\Delta_p$ ,  $\delta_p$ ), která je základní chybou měřicího přístroje používaného v referenčních podmínkách. Referenční podmínky jsou definovány teplotou okolí  $[(23 \pm 10) ^\circ\text{C}]$ , vnějším magnetickým polem ( $B_e < 5 \text{ mT}$ ), frekvencí ( $f_n \pm 10 \%$ ; pouze tam, kde je frekvence ovlivňující veličinou), činitelem zkreslení ( $k_z < 5 \%$ ; pro střídavé přístroje).

Absolutní chyba přístroje  $\Delta_p$  při referenčních podmínkách je definovaná vztahem (1.1).

Relativní chyba přístroje je obvykle vztažena k největší hodnotě měřicího rozsahu  $X_R$ :

$$\delta_{pM} = \frac{\Delta_p}{X_R} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.5)$$

V případě nedodržení referenčních podmínek dochází k přídavným chybám nazývaným změna údaje. Tyto změny se udávají pro změny jednotlivých ovlivňujících veličin. Výsledná relativní chyba údaje je určena součtem všech relativních změn údaje a relativní chyby přístroje v procentech pravé hodnoty.

Přesnost analogových měřicích přístrojů se vyjadřuje pomocí třídy. Třídy přesnosti TP podle normy jsou: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5. Hodnoty z této řady udávají mez dovolené relativní chyby přístroje v procentech nejvyšší hodnoty měřicího rozsahu  $\delta_{pM}$  při referenčních podmínkách.

Absolutní chyba údaje přístroje při vztažných podmínkách je dána vztahem:

$$\Delta_u = \pm \frac{|TP|}{100} \cdot X_R \quad (1.6)$$

Relativní chybu údaje lze určit podle vztahu:

$$\delta_u = \pm \frac{|\Delta_u|}{X_M} \cdot 100 = \pm \frac{X_R}{X_M} \cdot TP \quad [\%] \quad (1.7)$$

kde  $X_M$  je naměřená hodnota.

### 1.3.2 Chyby měření číslicových přístrojů

U voltmetrů, ampérmetrů a ohmmetrů se obvykle dovolená chyba přístroje udává součtem dvou poměrných chyb:

$$\delta = \pm (|\delta_1| + |\delta_2|) \quad [\% \text{ nebo p.p.m}] \quad (1.8)$$

První chyba  $\delta_1$  je vztažena k měřené hodnotě  $X_M$  a druhá chyba  $\delta_2$  k nejvyšší hodnotě měřicího rozsahu  $X_R$ . Druhá chyba může být zadána jako změna na nejnižším místě displeje.

Tyto chyby se označují jako základní chyby a platí při vztažných podmínkách. Při nedodržení vztažných podmínek vznikají přídavné chyby, definované teplotním koeficientem, např.  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  a časovou stabilitou, např. 30, 90 dní nebo 1 rok.

Absolutní chyby  $\Delta_{1U}$  a  $\Delta_2$  lze vypočítat:

$$\Delta_{1U} = \pm \frac{|\delta_1|}{100} \cdot X_M \quad (1.9)$$

$$\Delta_2 = \pm \frac{|\delta_2|}{100} \cdot X_R \quad (1.10)$$

Ze vztahů vyplývá, že absolutní chyba údaje  $\Delta_{1U}$  lineárně poroste se zvětšující se měřenou veličinou a absolutní chyba  $\Delta_2$  bude v celém rozsahu stejná. Relativní chyba  $\delta_1$  zůstává v celém rozsahu stejná a relativní chyba údaje  $\delta_{2U}$  se projevuje stejně jako chyba analogových přístrojů.

### 1.3.3 Chyby nepřímých měření

Nepřímá měření se používají tam, kde nelze měřit danou veličinu přímo. Výsledek nepřímých měření je určen matematickou funkcí několika proměnných, které jsou zjištěny přímým měřením. Hodnota hledané veličiny  $Y$  je dána funkcí  $n$  veličin označených  $X_1$  až  $X_n$  ( $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ). U všech dílčích veličin známe chyby údajů  $|\Delta_{X1}|$  až  $|\Delta_{Xn}|$ . Výsledná maximální chyba hledané veličiny je určena zákonem o hromadění chyb.

Jeho tvar

$$|\Delta_{T(Y)}| = \left| \frac{\partial Y}{\partial X_1} \right| \cdot |\Delta_{X1}| + \left| \frac{\partial Y}{\partial X_2} \right| \cdot |\Delta_{X2}| + \dots + \left| \frac{\partial Y}{\partial X_n} \right| \cdot |\Delta_{Xn}| \quad (1.11)$$

udává mezní absolutní chybu výsledku jako součet absolutních hodnot parciálních derivací funkce podle jednotlivých změřených veličin, násobených absolutní chybou, s kterou byla příslušná veličina určena. Relativní chyba je dána vztahem:

$$|\delta_{T(Y)}| = \frac{|\Delta_{T(Y)}|}{Y} \quad (1.12)$$

Ze vztahu (1.11) vyplývají pravidla pro určení výsledných chyb základních matematických operací. Výsledné chyby složitějších výrazů pak mohou být určeny bez výpočtu úplného diferenciálu postupnou aplikací těchto pravidel. Přitom je potřeba podle situace přecházet od relativních chyb k absolutním a naopak. Chyby pro některé matematické operace jsou uvedeny v tab. 1.1. [1.] [3.]

Tab. 1.1 Chyby pro základní matematické operace

Matematická operace	Absolutní chyba	Relativní chyba
$Y = n \cdot X$	$ \Delta_{T(Y)}  = n  \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)}  =  \delta_{T(X)} $
$Y = X^n$	$ \Delta_{T(Y)}  =  nX^{(n-1)}   \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)}  =  n   \delta_{T(X)} $
$Y = \sqrt[n]{X}$	$ \Delta_{T(Y)}  = \left  \frac{1}{n} X^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \right   \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)}  = \left  \frac{1}{n} \right   \delta_{T(X)} $
$Y = \ln X$	$ \Delta_{T(Y)}  = \frac{1}{X}  \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)}  = \frac{1}{\ln X}  \delta_{T(X)} $
$Y = X_1 + X_2$	$ \Delta_{T(Y)}  =  \Delta_{T(X_1)}  +  \Delta_{T(X_2)} $	$ \delta_{T(Y)}  = \frac{ \delta_{T(X_1)}  X_1 +  \delta_{T(X_2)}  X_2}{ X_1 + X_2 }$
$Y = X_1 - X_2$		$ \delta_{T(Y)}  = \frac{ \delta_{T(X_1)}  X_1 +  \delta_{T(X_2)}  X_2}{ X_1 - X_2 }$
$Y = X_1 \cdot X_2$	$ \Delta_{T(Y)}  =  \Delta_{T(X_1)}  X_2 +  \Delta_{T(X_2)}  X_1$	$ \delta_{T(Y)}  =  \delta_{T(X_1)}  +  \delta_{T(X_2)} $
$Y = \frac{X_1}{X_2}$	$ \Delta_{T(Y)}  = \frac{ \Delta_{T(X_1)}  X_2 +  \Delta_{T(X_2)}  X_1}{ X_2 ^2}$	
$Y = f(X_1, X_2)$	$ \Delta_{T(Y)}  = \left  \frac{\partial f}{\partial X_1} \right   \Delta_{T(X_1)}  + \left  \frac{\partial f}{\partial X_2} \right   \Delta_{T(X_2)} $	$ \delta_{T(Y)}  = \frac{\left  \frac{\partial f}{\partial X_1} \right   \Delta_{T(X_1)}  + \left  \frac{\partial f}{\partial X_2} \right   \Delta_{T(X_2)} }{ f(X_1, X_2) }$

## 1.4 Nejistoty měření

Pro hodnocení přesnosti se kromě starší chyby měření používá nověji i nejistota měření. Tento pojem byl zaveden na základě doporučení Mezinárodního výboru pro míry a váhy. V roce 1993 byla vydána Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO) první praktická příručka pro určování nejistot měření. Česká norma zabývající se touto problematikou ČSN EN 60359 vstoupila v platnost v roce 2003. V této normě je definována měřená hodnota jako střední prvek souboru, který reprezentuje měřenou veličinu a nejistotu měření jako rozsah hodnot, v nichž se může měřená hodnota s určitou jistotou pohybovat.

Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty měření je standardní nejistota. Je to směrodatná odchylka veličiny, pro kterou je nejistota uváděna.

### 1.4.1 Standardní nejistoty

Standardní nejistoty dělíme na dva základní typy A a B. Standardní nejistota typu A ( $u_A$ ) se určí statistickým zpracováním opakovaných měření podobně jako náhodné chyby měření. Je to směrodatná odchylka – míra rozptylu, která popisuje rozdělení jednotlivých hodnot shrnutých v průměru. Její příčiny jsou neznámé a její velikost klesá s počtem měření.

Standardní nejistota typu B ( $u_B$ ) nezávisí na počtu opakování měření podobně jako systematické chyby měření. Pocházejí od různých zdrojů např. přesnost přístroje (třída přesnosti analogového přístroje, přesnost číslicového přístroje) a ovlivňující parametry (okolní teplota atd.). Působení od více zdrojů se vyjádří výslednou standardní nejistotou typu B.

Kombinovaná standardní nejistota ( $u_C$ ) se získá sloučením standardní nejistoty typu A a výsledné standardní nejistoty typu B.

Rozšířenou standardní nejistotu dostaneme vynásobením kombinované standardní nejistoty příslušným koeficientem. Tato nejistota vymezuje interval okolo výsledku měření, ve kterém s určitou pravděpodobností leží výsledek měření

### 1.4.2 Výpočet standardních nejistot

Standardní nejistota je v podstatě směrodatná odchylka veličiny  $x$ . Výpočet směrodatné odchylky se provádí podle typu statistického rozdělení.

Pro veličiny s normálním rozdělením, které je dáno Gaussovou křivkou, je standardní nejistota dána polovinou šířky intervalu kolem výsledku měření  $\bar{x}$ , ve kterém se s pravděpodobností asi 68 % nalézá skutečná hodnota měřené veličiny. Aproximace normálním rozdělením se používá tam, kde se mohou častěji vyskytovat malé odchylky od jmenovité hodnoty a zároveň s rostoucí velikostí odchylek se snižuje pravděpodobnost jejich výskytu. Normální rozdělení má většinou standardní nejistota typu A.

Výběrová směrodatná odchylka a tedy standardní nejistota veličiny s normálním rozdělením se vypočte ze vztahu:

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.13)$$

kde  $n$  je počet opakování měření,  $x_i$  jsou hodnoty provedených měření a  $\bar{x}$  je aritmetický průměr, který se vypočte ze vztahu  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ . Spolehlivého výpočtu se dosáhne pokud je počet opakování větší nebo roven 10.

Pro veličiny s rovnoměrným rozdělením je standardní nejistota dána polovinou šířky intervalu kolem výsledku měření  $\bar{x}$ , ve kterém se s pravděpodobností asi 58 % nalézá skutečná hodnota měřené veličiny. Aproximace rovnoměrným rozdělením se používá tam, kde je stejná pravděpodobnost výskytu kterékoliv odchylky v celém daném intervalu  $\pm \Delta x$ . Rovnoměrné rozdělení má většinou standardní nejistota typu B, jedním z důvodů je i nedostatek znalosti rozdělení odchylek, proto se žádná neupřednostňuje.



Standardní nejistota a tedy směrodatná odchylka veličiny s rovnoměrným rozdělením se vypočte ze vztahu:

$$\sigma = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} \quad (1.14)$$

kde  $\Delta x$  je interval, ve kterém leží všechny hodnoty měřené veličiny.

Kombinovanou standardní nejistotu  $u_C$  získáme sloučením nejistot A a B podle vztahu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1.15)$$

Z důvodu, že pravděpodobnost, že se nalézá v intervalu  $\bar{x} \pm \sigma$  skutečná hodnota měřené veličiny je jenom 68 % pro normální rozdělení a pouze 58 % pro rovnoměrné rozdělení, násobíme standardní nejistotu koeficientem rozšíření  $k$  a získáváme tak rozšířenou nejistotu  $U$ :

$$U = k \cdot u_C \quad (1.16)$$

Koeficient rozšíření  $k$  se volí podle toho, jak vysoké pravděpodobnosti, že se v intervalu  $\bar{x} \pm U$  nachází skutečná hodnota měřené veličiny, chceme dosáhnout. Pro pravděpodobnost 95 % pro normální rozdělení je  $k = 2$  a pro rovnoměrné rozdělení je  $k = 1,65$ . U kombinované standardní nejistoty, která obvykle obsahuje dvě standardní nejistoty (typu A, která má většinou normální rozdělení a typu B, která má obvykle rovnoměrné rozdělení) se pak volí koeficient rozšíření  $k$  podle normálního rozdělení.

### 1.4.3 Nejistoty nepřímých měření

Při nepřímých měření se měřená veličina  $Y$  vypočte pomocí známé funkční závislosti z  $n$  veličin  $X_i$ , získaných přímým měřením, jejichž odhady a nejistoty známe. Měřená veličina je tedy dána funkcí  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ , kde  $f$  je známá funkce. Odhad  $y$  hodnoty výstupní veličiny  $Y$  je možné určit ze vztahu  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ , kde  $x_1, x_2, \dots, x_N$  jsou odhady vstupních veličin  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . Při určování nejistot nepřímých měření se používá geometrický součet, na rozdíl od výpočtu chyb nepřímých měření, kde se používá aritmetický součet. V případě, že mezi vstupními veličinami není závislost, je zákon šíření nejistot dán vztahem: [3.]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2 \quad (1.17)$$

## 1.5 Měřicí převodníky

Ve výrobě a rozvodu elektrické energie je nutné měřit proudy a napětí značně rozmanitých hodnot. Z tohoto důvodu se používají měřicí převodníky, které u elektrických měřicích přístrojů mohou upravovat velikost měřené veličiny tak, aby ji měřicí ústrojí mohlo bez poškození

a s dostatečnou přesností měřit nebo mohou převádět jednou elektrickou veličinu na jinou elektrickou veličinu. [3.] [4.]

### 1.5.1 Bočníky

Bočníky jsou přesné odpory, které se připojují paralelně k měřicímu ústrojí tak, že jimi prochází část měřeného proudu. Jejich použití nám umožní měřit větší proudy, než na jaké je ústrojí dimenzováno. Pokud jsou zařazeny do obvodu, je možné měřit proud tak, že měříme na nich vznikající úbytek napětí. Pro větší proudy bývá bočník prostorově oddělen od měřicího přístroje. Mohou být v měřicím přístroji zabudovány nebo jsou oddělené jako příslušenství k měřicímu přístroji. Působení bočníku je definováno vztahem:

$$I_a = \frac{R_b}{R_b + R_a} \cdot I = \frac{1}{n} \cdot I \quad (1.18)$$

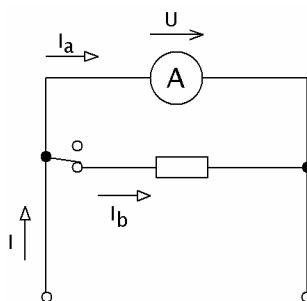
Pro  $n$ -násobné zvětšení rozsahu bude tedy bočník mít hodnotu:

$$R_b = \frac{R_a}{n - 1} \quad (1.19)$$

V rovnici je  $R_a$  odpor měřicího přístroje zahrnující odpor spojovacího vedení od potenciálních svorek bočníku ke svorkám měřicího přístroje,  $R_b$  je odpor bočníku a  $n$  je poměr bočníku, který udává kolikrát se zvětší proudový rozsah přístroje. Bočníky musí mít dvě přívodní a dvě potenciální svorky. Důvodem je vyloučení vlivu přechodových odporů na styku proudových přívodů s přívodními svorkami.

Stejnoseměrné bočníky jsou používány u magnetoelektrických a tepelných přístrojů. Pro přesná měření je potřeba použít cejchované přívody.

Střídavé bočníky se používají u klasických univerzálních přístrojů, ke snímání proudů oscilogramem, nebo pro měření velkých proudů při zkratových zkouškách. Jejich uplatnění je při měření nízkofrekvenčních a neharmonických průběhu zejména se stejnosměrnou složkou. Přesnost ovlivňuje hlavně indukčnost a kapacita celé soustavy bočník, spojovací vodiče a přístroj.



Obr. 1.1 Příklad zapojení bočníku do obvodu

### 1.5.2 Předřadníky

Předřadníky se zapojují před ústrojí voltmetrů a wattmetrů, za účelem zvětšení měřicího rozsahu vlastního ústrojí. Používají se u všech druhů přístrojů kromě elektrostatických pro napětí do 600 V, výjimečně do 3000 V. Působení předřadníku je u přístrojů ukazovacích i integrujících dáno vztahem:

$$U_a = U \cdot \frac{R_a}{R_a + R_p} = \frac{1}{n} \cdot U \quad (1.20)$$

Pro zvětšení rozsahu  $n$ -násobně bude tedy mít předřadník hodnotu:

$$R_p = (n - 1) \cdot R_a \quad (1.21)$$

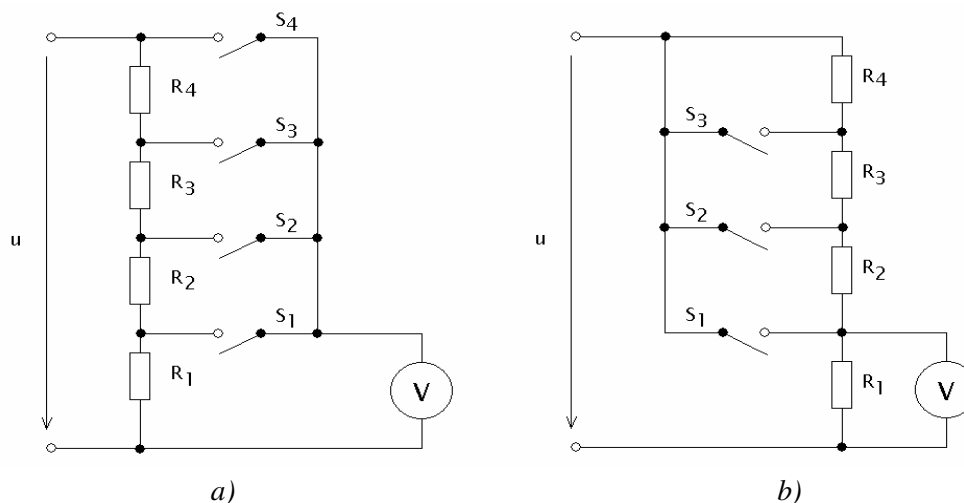
U předřadníku se požaduje, aby se jeho odpor neměnil v čase. Dále by měla být jeho závislost na teplotě co nejmenší. Většinou je předřadník oddělen od měřicího ústrojí, aby jej nevyhříval. Pro použití u střídavých přístrojů je potřeba omezit vliv indukčnosti a kapacit rozdělením předřadníku do několika sekcí vinutých v jedné vrstvě, opačnou orientací sekcí atd. U střídavých elektrostatických voltmetrů je možné, místo předřadníku použít kondenzátor, podle vztahu:

$$C_p = \frac{C_a}{n - 1} \quad (1.22)$$

kde  $C_a$  je kapacita ústrojí. [4.] [5.]

### 1.5.3 Děliče napětí

Děliče napětí se skládají z přesných a zpravidla z přepínatelných rezistorů v zapojení s voltmetrem podle obr. 1.2 a), kde dělič zároveň zajišťuje konstantní vstupní odpor voltmetru. Používají se ke snížení velikosti měřeného napětí na hodnotu, kterou je přístroj schopen zpracovat. Nejčastěji se s nimi můžeme setkat u elektronických měřicích přístrojů, jejichž spotřeba je malá, a proto tak neovlivňují převodový poměr, který závisí na zatížení. Vstupní odpor přístroje jako celku je určen vstupním děličem. Při měření napětí o velikosti nepřesahující rozsah ústrojí, zmenší dělič částečně vstupní odpor voltmetru. V situacích, kde není možné jinak zařídit přizpůsobení děliče ke vstupnímu kompenzačnímu odporu, se použije dělič podle obr. 1.2 b), který má konstantní výstupní odpor. Dělič napětí je možné složit i z indukčností nebo kapacit. Tím, ale vzniká nevýhoda kmitočtové závislosti děliče, výhodou je možnost přesného nastavení dělicích poměrů počtem závitů. V případech, kdy jde o měření nízkého kmitočtu nebo průběhu se stejnosměrnou složkou se děliče používají jako náhrada měřicích transformátorů napětí. [5.]



Obr. 1.2 Příklady zapojení děliče napětí

### 1.5.4 Měřicí transformátory

Měřicí transformátory jsou převodníky, které nejsou součástí měřicích přístrojů. Jsou nepostradatelné ve výrobě a rozvodu elektrické energie. Jejich účelem je změna velikostí měřených proudů a napětí, na takové hodnoty, aby byly měřitelné běžnými ampérmetry a voltmetry. Galvanicky oddělují měřený obvod od měřicího obvodu. Oproti bočníkům a předřadníkům jsou schopny zvětšovat i zmenšovat rozsah v širokých mezích s výrazně nižšími ztrátami.

#### 1.5.4.1 Měřicí transformátory proudu

Pracují blízko stavu nakrátko. Dokud prochází primárním vinutím proud, nesmí se rozpojit sekundární obvod. Při rozpojení se jádro přesytí a do sekundárního vinutí se indukují napěťové špičky, které mohou způsobit průraz izolace mezi primárním a sekundárním vinutím. Proto se MTI vybavují na sekundární straně zkratovacím zařízením. Obvyklé je jmenovitý sekundární proud 5 A, popř. 1 A. Velikosti časových vektorů obou proudů mají být ve stálém poměru:

$$I_1 = k_I \cdot I_2 \quad (1.23)$$

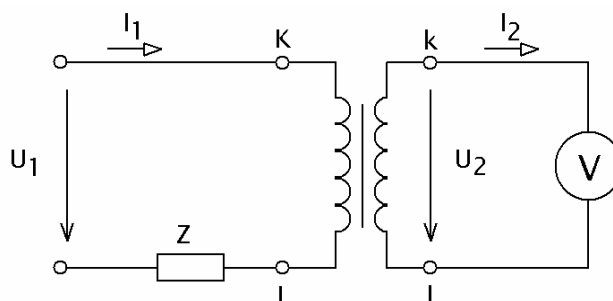
kde  $k_I$  je jmenovitý převod,  $I_1$  je primární a  $I_2$  sekundární proud.

Časové vektory proudu  $I_1$  a  $I_2$  nemají takovou velikost, jaká by se očekávala pro jmenovitý převod  $k_I$ , ale jsou fázově posunuty. MTI má tedy chybu (odchylku) proudu:

$$\varepsilon_I = \frac{k_I \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad [\%; \text{ A}] \quad (1.24)$$

Další chybou je úhlová chyba (odchylka fázová), která je definována jako úhel, který svírá časový vektor sekundárního proudu, otočený o  $180^\circ$  s vektorem primárního proudu.

Na sekundární stranu MTI se připojují v sérii zapojené cívky ampérmetrů, wattmetrů a proudové cívky ochranných relé. Impedance těchto cívek včetně přívodů a spojů vytváří tzv. břemeno. Velikost břemena nesmí překročit jmenovitou hodnotu  $Z_n$ , jinak mohou chyby měřicího transformátoru překročit meze třídy přesnosti.



Obr. 1.3 Zapojení měřicího transformátoru proudu

#### 1.5.4.2 Měřicí transformátory napětí

Pracuji blízko stavu naprázdno a předpokládáme zatížení pouze spotřebou měřicích přístrojů. V případě zkratu na sekundárních svorkách MTU může dojít k jeho zničení velkými zkratovými proudy. Většinou je hodnota sekundárního napětí rovna  $U_2 = 100\text{ V}$  nebo  $U_2 = 100/\sqrt{3}\text{ V}$ , popř.  $110\text{ V}$  nebo  $100/\sqrt{3}\text{ V}$ . Velikosti časových vektorů obou napětí mají být ve stálém poměru:

$$U_1 = k_U \cdot U_2 \quad (1.25)$$

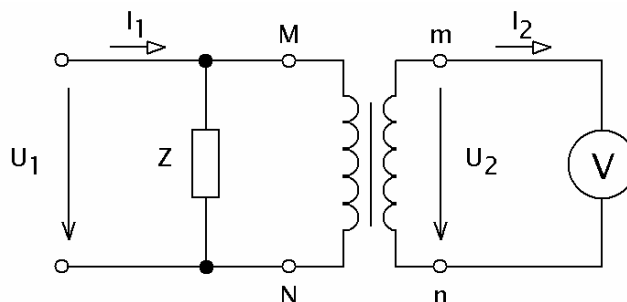
kde  $k_U$  je jmenovitý převod,  $U_1$  napětí na primární straně transformátoru a  $U_2$  na sekundární.

Časové vektory napětí  $U_1$  a  $U_2$  nemají takovou velikost, jaká by se očekávala pro jmenovitý převod  $k_U$ , ale jsou fázově posunuty. MTU má tedy chybu napětí:

$$\varepsilon_U = \frac{k_U \cdot U_2 - U_1}{U_1} \quad [\%; \text{ V}] \quad (1.26)$$

Další je chyba úhlu (chyba fázová), která je dána úhlem, který svírá časový vektor sekundárního napětí otočený o  $180^\circ$  s vektorem primárního napětí.

Na sekundární stranu MTU se paralelně připojují napěťové cívky voltmetrů, wattmetrů a cívky ochranných relé. Impedance těchto cívek včetně přívodů a spojů vytváří tzv. břemeno. Celková velikost břemena nesmí překročit jmenovitou hodnotu  $Z_n$ , jinak mohou chyby měřicího transformátoru překročit meze třídy přesnosti. [3.] [4.] [5.]



Obr. 1.4 Zapojení měřicího transformátoru napětí

## 1.6 Virtuální měřicí přístroje

Výpočetní technika se díky zvyšování výkonu a snižování pořizovací ceny, začíná uplatňovat i v oboru měřicí techniky. S jejím nástupem se usnadňuje a zefektivňuje práce uživatelů a snižují se náklady na výrobu a vývoj měřicích přístrojů.

### 1.6.1 Měřicí přístroje s rozhraním

U klasických analogových měřicích přístrojů bez komunikačního rozhraní jsou jejich uživatelé odkázáni na využívání funkcí definovaných pouze výrobcem přístroje. Také způsob přebírání naměřených hodnot koncovým uživatelem je u těchto přístrojů omezen a to většinou na opisování údajů z displeje. Toto samozřejmě může být zdrojem chyb měření.

Dalším stupněm vývoje měřicí techniky jsou měřicí přístroje vybavené komunikačním rozhraním. U těchto měřicích přístrojů je díky přímé komunikaci měřicího přístroje s počítačem vyloučen lidský činitel při přebírání naměřených hodnot.

Díky propojení počítače s měřicím přístrojem, lze přidat k funkcím definovaným jeho výrobcem navíc funkce, které lze naprogramovat do řídicího počítače. Funkce měřicího přístroje můžeme v tomto případě omezit na sejmutí měřených dat a jejich přenos pomocí rozhraní do počítače, který provede jejich další zpracování. Z toho vyplývá možná úspora financí, kdy lze například z digitálního osciloskopu vytvořit frekvenční analyzátor, který je daleko dražší (osciloskop zde pouze sejme měřený průběh a pošle jej pomocí sběrnice do počítače, který provede frekvenční analýzu naměřených dat). Flexibilita těchto měřicích systémů je vysoká. V případě, že potřebujeme funkci, kterou měřicí přístroj není vybaven, lze ji vytvořit pomocí softwaru na připojeném počítači.

V současnosti se při vývoji výpočetní i měřicí techniky používá, stejných koncepcí a komponentů (mikroprocesory, paměti, sběrnice atd.). Moderní měřicí přístroje mají obvykle multiprocessorový systém se základní vrstvou softwaru tzv. firmwarem, který řídí jeho činnost. U těchto přístrojů lze v určitých mezích měnit jejich chování a použít pružně programovatelných ovládacích prvků na čelním panelu. Vzhledem k rostoucímu počtu funkcí má většina současných měřicích přístrojů ovládací tlačítka, kterým je přiřazena v každé fázi konfigurace jiná funkce.

V současnosti se používají převážně čtyři typy dále popsanych rozhraní umožňujících komunikaci měřicího přístroje a počítače. [6.]

### **1.6.1.1 Rozhraní RS 232**

Výhodami tohoto sériového rozhraní je jednoduchost, nízká cena kabeláže (pro jeden směr komunikace stačí jeden signálový a jeden společný zemní vodič), standardní vybavení na straně počítače a relativně velká vzdálenost, na kterou je možné měřicí přístroj ovládat.

Nevýhodami tohoto rozhraní je omezení na pouze dva komunikující protějšky (počítač a měřicí přístroj) a malá propustnost, která je dána sériovým řazením informace po bitech a nutností redundantní informace pro synchronizaci přenosu (standard je max. 115 kb/s).

### **1.6.1.2 Rozhraní GPIB**

Toto paralelní rozhraní zavedla firma Hewlett – Packard v roce 1965 pod názvem HP-IP. V roce 1975 bylo zdokonalené do podoby IEEE standardu 488 a dále v roce 1987 do podoby ANSI/IEEE 488.1 standardu. Později došlo k rozšíření na ANSI/IEEE 488.2 standard. V současnosti se dále rozvíjí firmou National Instruments pod označením GPIB.

Výhodami tohoto rozhraní je vysoká přenosová rychlost přes 1 Mb/s, možnost připojení až 14 měřicích přístrojů na jeden počítač a v případě IEEE 488.2 standardizovaný protokol pro řízení měřicích přístrojů přijatý všemi výrobci, kteří toto rozhraní u svých přístrojů používají.

Nevýhodami tohoto rozhraní je omezení vzdálenosti komunikujících přístrojů (maximální celková délka kabelu je 20 m), potřeba dovybavení počítače modulem tohoto rozhraní (zásuvná karta GPIB popř. konvektor rozhraní Centronics nebo RS 232) a vyšší cena kabeláže. [3.] [6.]

### **1.6.1.3 Rozhraní USB**

Tato univerzální sériová sběrnice vznikla díky spolupráci firem Compaq, Hewlett – Packard, Intel, Lucent, NEC, Microsoft a Philips. Označuje se za nástupce sériových a paralelních portů PC. Výhodou je možnost připojení až 127 zařízení s použitím HUBu. Nevýhodou je nízká garantovaná maximální délka kabelu mezi připojenými zařízeními (5 m).

V současnosti se můžeme setkat již se třemi verzemi tohoto rozhraní. Verze USB 1.1 má dva režimy pro pomalá zařízení (Low-Speed) s přenosovou rychlostí 1,5 Mb/s a rychlá zařízení (Full-speed) s rychlostí 12 Mb/s. Novější verze USB 2.0 nabízí maximální rychlost 480 Mb/s a zachovává si zpětnou kompatibilitu s USB 1.1. Zatím poslední je verze USB 3.0, která používá 8 vodičů namísto původních 4. Disponuje přenosovou rychlostí 5 Gb/s a zpětně podporuje USB 2.0. [12.]

#### 1.6.1.4 Rozhraní Ethernet

V současnosti se můžeme u měřicí techniky setkat s rozhraním Ethernet, které tvoří další alternativu k výše uvedeným rozhraním.

Výhodami tohoto rozhraní je připojení měřicího přístroje na standardní médium lokální počítačové sítě (koaxiální kabel, kroucená dvoulinka) v místě měření přes standardní vstup do sítě, možnost konfigurovat měřicí přístroj a zpracovávat naměřené hodnoty v jiném místě lokální počítačové sítě nebo kdekoli z internetu – neomezená vzdálenost, velká propustnost (standardně 10/100 Mb/s, ale je definovaná i rychlost 1 Gb/s) a možnost použití standardních protokolů komunikace mezi počítači (TCP/IP).

Nevýhodami tohoto rozhraní je skutečnost, že málo výrobců měřicí techniky vyrábí své přístroje s tímto rozhraním a standardní obslužné programy jsou většinou navrženy pro práci s rozhraními RS 232 a GPIB.

#### 1.6.2 Virtuální instrumentace

Vzhledem k tomu, že při měření pomocí měřicího přístroje propojeného pomocí komunikačního rozhraní na počítač se často z měřicího přístroje využije jenom vstupních obvodů a paměti dat, vedlo další úsilí vývoje této techniky směrem k virtuálním měřicím přístrojům.

Podstatou virtuálního přístroje je doplnění počítače měřicí kartou (před měřicí kartu se většinou zařazují vstupní obvody pro přizpůsobení velikosti měřených veličin velikosti vstupních napětí měřicí karty) vybavenou konektorem pro zasunutí do systémové desky počítače (ISA, EISA, PCI sběrnice) a programem pro počítač, který realizuje všechny funkce měřicího přístroje, tak jako firmware měřicího přístroje. Tímto je zabráněno duplicitě, která vzniká při propojení měřicího přístroje a počítače.

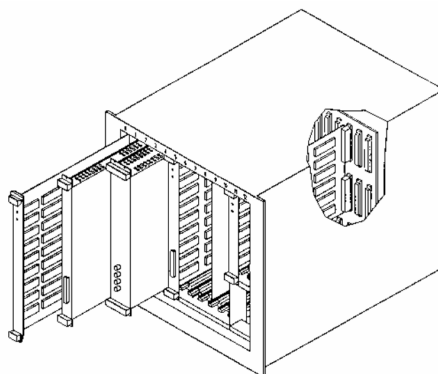
Výhodou virtuálního měřicího přístroje je, že si ponechává vlastnosti personálního počítače – standardní media pro ukládání dat (pevný disk, flash disk, CD), snadné připojení k perifériím (tiskárna, modem) a konektivita do počítačových sítí, díky které je možné sdílení naměřených dat a dálkové ovládání přístroje. Mimo toho je možné úpravou vytvořené aplikace snadno změnit jeho funkci.

#### 1.6.3 VXI Sběrnice

U měřicích karet je hlavní omezení ve velikosti dosažitelné vzorkovací frekvence a současnosti snímání z více kanálů. Běžné měřicí karty pro ISA sběrnici mají maximální vzorkovací frekvence pro neperiodické signály řádu stovek až milionů vzorků za sekundu (100 kS/s – 1 MS/s, interval mezi vzorky 1 – 10  $\mu$ s). Špičkové osciloskopy mají v současnosti tento parametr až o čtyři řády lepší (10 GS/s, interval mezi vzorky 100 ps). Toto omezení rychlosti měření je dáno hlavně architekturou A/D převodníku a šířkou a časováním sběrnice mezi kartou a počítačem.



Měřicí systémy na bázi VXI sběrnice toto omezení překonávají. Jejich architektura je tvořena tzv. mainframem (rámem s napájecím zdrojem a sběrnici o šířce 32 bitů propojující v něm až 13 pozic). Na pozici 0 se nasazuje jednodeskový počítač nebo konvertor VXI sběrnice na protokol GPIB, přes který se připojí řídicí počítač s kartou GPIB. Do dalších pozic se zasouvají měřicí přístroje v podobě zásuvných modulů, na kterých jsou v podstatě pouze vstupní obvody, převodníky a přípojná místa pro měřený signál (nemají čelní panel). Mezi výhody této sběrnice patří velká propustnost a přesné časování (spuštění měření), malé rozměry, menší náchylnost k ovlivnění měření rušivými signály, delší střední doba mezi opravami a kratší doba opravy. [3.] [6.]



Obr. 1.5 Fyzická podoba VXI měřicího systému

## 1.7 A/D převodníky

Základní částí číslicové měřicí techniky jsou analogovo-digitální (A/D) převodníky, které jsou určeny k převodu spojitého (analogového) signálu na signál diskrétní (digitální). Tento převod umožňuje číslicové zpracování původně analogových signálů. V diskrétní podobě se také dají signály mnohem kvalitněji zaznamenávat a přenášet.

Vstupním signálem je většinou napětí. Výstupní signál tvoří datové slovo o stanoveném počtu bitů. Samotný převod spojitého signálu na diskrétní se skládá ze dvou kroků. Nejprve se provede periodické vzorkování analogového signálu, což je odebrání vzorků ze signálů v pravidelných časových intervalech. V dalším kroku se pomocí tzv. kvantování přiřadí jednotlivým vzorkům diskrétní hodnota. Abychom dosáhli požadované přesnosti převodu musí se dodržet následující podmínky:

- *vzorkovací kmitočet* musí být podle Shannon-Kotělnikova teorému minimálně dvakrát větší, než je nejvyšší kmitočet obsažený ve vzorkovaném signálu,
- *vzorkovací impulsy* musí být dostatečně úzké,
- *kvantování vzorkovacích impulsů* musí být dostatečně jemné, to znamená, že výstupní datové slovo musí mít dostatečný počet bitů.

Tyto procesy jsou omezeny dostupnými technickými možnostmi. Rychlost změny analogového signálu, kterou je možno zachytit a převést je závislá na rychlosti a rozlišovací schopnosti kvantovacího obvodu A/D převodníku.

Jedním z nejvýznamnějších parametrů A/D převodníků je rychlost vzorkování vstupního signálu. Jak bylo uvedeno výše, je potřeba přenést více než dva body amplitudy nejvyšší kmitočtové složky sledovaného signálu. V případě, že nás některá složka s vyšším kmitočtem nezajímá nebo způsobuje chybu v následném zpracování dat (např. šumový signál), je možné ji odstranit pomocí dolnofrekvenční propusti.

Rychlost převodu A/D převodníku je obvykle stejná jako rychlost vzorkování. Jinak řečeno rychlost vzorkování vyplývá z nejkratší možné doby převodu. Doba převodu lze určit jako dobu od přivedení vstupního analogového napětí na vstup převodníku do okamžiku, kdy je na výstupu převodníku platné výstupní datové slovo. Vyjadřuje se také počtem úplných převodů za jednotku času nebo počtem bitů za jednotku času.

Rozlišovací schopnost je určena počtem úrovní, na které je rozdělen rozsah dovoleného vstupního napětí. Pro rozlišovací schopnost platí:

$$Q = \frac{1}{2^n - 1} \quad (1.27)$$

Čím je větší rozlišovací schopnost, tím je menší rychlost převodu. Rozlišovací schopnost je rovna kvantizačnímu kroku  $Q$ . Při kvantování vzniká tzv. kvantizační chyba, která je rovná polovině kvantizačního kroku. Další chyby jsou způsobeny změnami převodní charakteristiky od ideálního tvaru. Jsou to chyby zaviněné napěťovým posunem, změnou zisku převodníku a nelinearitou převodníku.

V důsledku schodovitého průběhu převodní charakteristiky vzniká odchylka od ideálního průběhu a to se projevuje jako kvantizační šum SNR (Signal-to-noise Ratio). Teoretické SNR pro sinusový signál je dáno vztahem:

$$SNR = 6,02 \cdot n + 1,76 \quad [\text{dB}] \quad (1.28)$$

kde  $n$  je počet bitů datového slova. Chyby A/D převodníku způsobují že skutečné SNR se liší od ideálního, proto se pro porovnání kvality A/D převodníků používá efektivní počet bitů ENOB (Effective Numer of Bits):

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76}{6,02} \leq n \quad (1.29)$$

### 1.7.1 Typy A/D převodníků

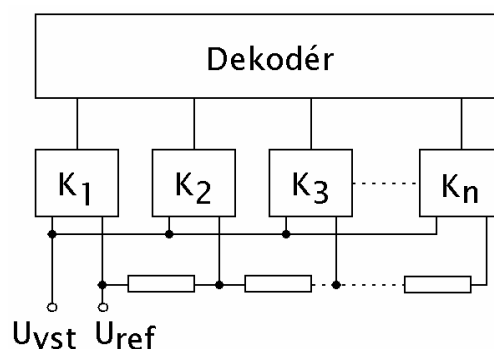
A/D převodníky dělíme podle způsobu činnosti na synchronní a asynchronní. Synchronní převodníky provádí převod analogového napětí na výstupní datové slovo v určitém počtu kroků, které se uskutečňují synchronně s hodinovými (taktovacími) impulsy. Asynchronní převodníky mohou také provádět převod v několika krocích, ale doba trvání jednotlivých kroků závisí výhradně na časové odezvě dílčích obvodů převodníku a na jejich zpoždění.

Dále je možné A/D převodníky dělit podle druhu vstupního signálu na přímé a nepřímé. Přímé převodníky provádí rovnou převod vstupního analogového napětí na výstupní datové slovo. U nepřímých převodníků je vstupní analogové napětí nejprve převedeno určitým obvodem na jinou analogovou veličinu (např. dobu trvání impulsu) a teprve další obvod provádí převod této veličiny na výstupní datové slovo.

### 1.7.1.1 Paralelní A/D převodník

Paralelní komparační A/D převodník je principiálně nejjednodušším typem přímého A/D převodníku. Vstupní analogové napětí se přivádí současně na vstupy soustavy  $m$  napěťových komparátorů (pro  $n$ -bitové datové slovo je počet komparátorů  $m = 2^n - 1$ ). Toto napětí se na komparátorech porovnává s nastaveným referenčním napětím  $U_{refi}$ , které je pro každý komparátor jiné a výstup jednotlivých komparátorů překlápí pokud je  $U_{vst} \geq U_{refi}$ . Pomocí převaděče kódu se pak převedou výstupy z jednotlivých komparátorů na výstupní datové slovo.

Doba převodu tohoto převodníku je dána přenosovým zpožděním, resp. dobou ustálení napěťových komparátorů a přenosovým zpožděním v převodníku kódu. Tento převodník je nejrychlejší typ přímého A/D převodníku. Jeho nevýhodou je, vzhledem k velkému počtu napěťových komparátorů, vysoká cena.

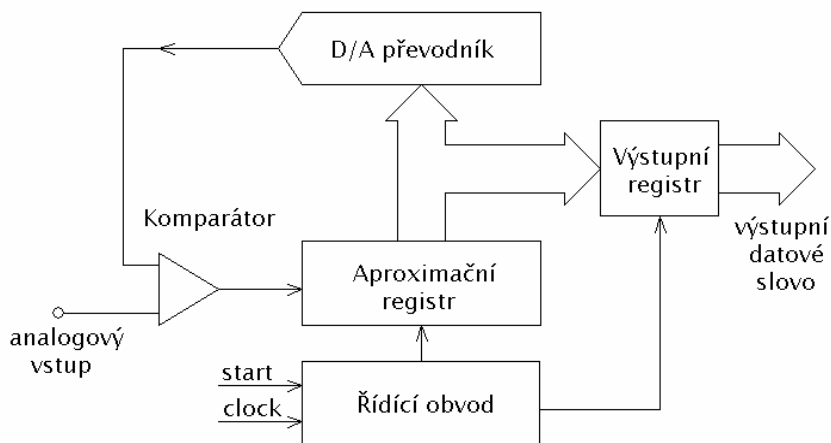


Obr. 1.6 Paralelní A/D převodník

### 1.7.1.2 A/D převodník s postupnou aproximací

A/D převodník s postupnou aproximací provádí převod vstupního analogového napětí na výstupní datové slovo postupně po krocích. Počet kroků je roven počtu bitů výstupního datového slova. Součástí tohoto převodníku je D/A převodník, napěťový (ojedinele proudový) komparátor, aproximační registr a výstupní registr. Převod se provádí postupně od nejvyššího bitu k nejnižšímu, pomocí metody půlení intervalu. Řídící obvod převodníku nastaví hodnotu testovaného bitu (testované napěťové úrovně) na hodnotu 1 a napěťový komparátor porovná hodnotu příslušného referenčního napětí generovaného D/A převodníkem s hodnotou vstupního napětí. Pokud je vstupní napětí větší než referenční, tak zůstává v příslušném bitu datového slova v aproximačním registru zachována jednička. Pokud je tomu naopak, tak se dosadí na toto

místo nula. Dále převod pokračuje nastavením následujícího bitu na jedničku a porovnáním příslušné úrovně napětí. Porovnání proběhne tolikrát, kolika bitový převodník je. Doba převodu tedy nezávisí na velikosti převáděného napětí. Čím více bitový převodník použijeme tím bude převod přesnější, ale bude trvat déle.

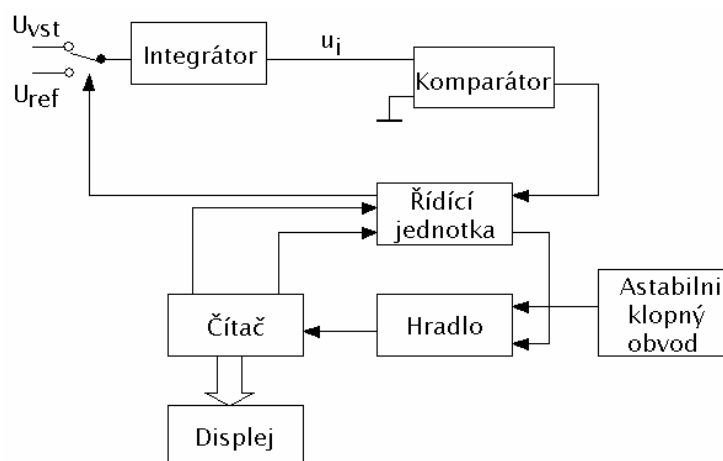


Obr. 1.7 A/D převodník s postupnou aproximací

### 1.7.1.3 A/D převodník s dvojí integrací

A/D převodník s dvojitou integrací patří mezi nepřímé převodníky. Vstupní analogové napětí se nejprve převádí na dobu trvání určitého elektrického signálu a velikost vstupního napětí se určuje podle hodnoty slova v čítači, který je tímto napětím zprostředkovaně řízen.

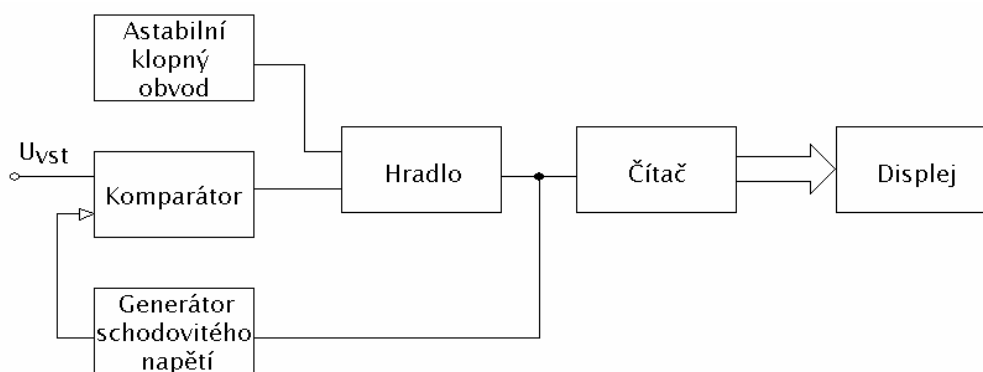
Na začátku převodu je na integrátor přiváděno vstupní analogové napětí  $U_{vst}$ . Napětí za integrátorem  $u_i$  klesá tak rychle, jak velké je vstupní napětí  $U_{vst}$ . Současně se přes otevřené hradlo plní čítač impulsy z astabilního klopného obvodu. V okamžik, kdy se čítač naplní, řídicí jednotka jej vynuluje a přivede na vstup integrátoru referenční napětí  $U_{ref}$ . Napětí  $U_{ref}$  je opačné polarity než napětí  $U_{vst}$ , proto se napětí za integrátorem  $u_i$  vrací k nule. Současně se přes otevřené hradlo opět plní čítač impulsy z astabilního klopného obvodu. V okamžik, kdy dosáhne napětí za integrátorem  $u_i$  nuly, řídicí jednotka uzavře hradlo. Načítané impulsy odpovídají hodnotě vstupního napětí  $U_{vst}$ . Popsaný cyklus se opakuje. Tyto převodníky se vyznačují poměrně malou rychlostí převodu a odolností proti sériovému rušení frekvencí síťového napájecího napětí.



Obr. 1.8 A/D převodník s dvojí integrací

#### 1.7.1.4 Kompenzační A/D převodník se schodovitým napětím

Hlavním blokem kompenzačního A/D převodníku se schodovitým napětím je komparátor, který srovnává vstupní napětí  $U_{vst}$  s referenčním napětím. Astabilní klopný obvod přivádí na vstup hradla obdélníkové impulsy o stálé frekvenci. Hradlo tyto impulsy propouští do čítače a generátoru schodovitého napětí tak dlouho, dokud je referenční napětí přiváděné z generátoru schodovitého napětí na komparátor menší než vstupní napětí. (Napětí z generátoru schodovitého napětí vzrůstá s každým impulsem o jeden kvantizační krok.) Potom je převod ukončen, čítač se vynuluje a popsaný cyklus se opakuje. Počet schodů na celý rozsah vstupního napětí je dán počtem bitů převodníku. Čím je vyšší vstupní napětí, tím je vyšší počet impulsů načítaných čítačem. To znamená, že doba převodu závisí na velikosti vstupního napětí. [3.] [7.] [13.]



Obr. 1.9 A/D převodník se schodovitým napětím

## 2 Kvalita elektrické energie z pohledu norem

Kvalitu elektřiny definujeme charakteristikami napětí, které jsou proměnné a mohou mít vliv na užitečnost elektrické energie pro spotřebitele. Vzhledem k využití elektřiny je požadováno, aby napájecí napětí mělo konstantní kmitočet, dokonale sinusový průběh vlny a konstantní amplitudu. Toho však v praxi nelze zcela dosáhnout, protože existuje mnoho faktorů, které způsobují odchylky. [8.] [9.]

### 2.1 Norma ČSN EN 50160

Tato evropská norma popisuje a udává hlavní charakteristiky napětí v místech připojení uživatelů z veřejných distribučních sítí nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí za normálních provozních podmínek. Norma udává meze nebo hodnoty charakteristických hodnot napětí, jaké může uživatel sítě očekávat za normálních provozních podmínek. Nepopisuje průměrný stav veřejné distribuční sítě. Nevztahuje se na mimořádné provozní podmínky, jako je dočasné zapojení sítě umožňující napájení uživatelů za podmínek vyvolaných poruchou, nebo během údržby a výstavbových prací nebo s cílem minimalizace rozsahu a trvání ztráty napájení. Dále se nevztahuje na případy, kdy instalace nebo zařízení nevyhovuje příslušným normám nebo technickým připojovacím podmínkám pro uživatele a na výjimečné situace, které dodavatel elektřiny nemůže ovlivnit.

Předmětem této normy je definování, popis a specifikace charakteristik napájecího napětí, které se týkají kmitočtu, velikosti, tvaru vlny a symetrie třífázových napětí.

Pro veřejnou síť nízkého napětí je normalizované jmenovité napětí  $U_n = 230 \text{ V}$ , buď mezi fází a uzlem pro čtyřvodičové trojfázové soustavy nebo mezi fázemi pro třívodičové trojfázové soustavy. Charakteristiky uvedené v této normě pro síť vn se vztahují na síť s napětím vyšším než 1 kV až do 36 kV včetně. Charakteristiky pro síť vvn se vztahují na síť s napětím vyšším než 36 kV až do 150 kV včetně. Pro síť vysokého a velmi vysokého napětí je velikost napětí dána dohodnutým napájecím napětím  $U_c$ . Charakteristiky napětí dodávané elektrické energie z veřejných distribučních sítí lze rozdělit podle jejich hlavních rozdílů, které jsou uvedeny následně:

- *průběžný jev*, jako jsou odchylky od jmenovitých hodnot, které se vyskytují v průběhu času. Takový jev je hlavně způsoben charakterem zatížení, změnami zatížení a nelineárními zatíženími;
- *napěťové události*, náhlé a závažné odchylky od normálního nebo požadovaného tvaru vlny. Napěťové události jsou typicky způsobeny neočekávatelnými událostmi (například poruchy) nebo vnějšími vlivy (například počasí, cizí zavinění). [8.]

Pro doplnění jsou zde zmíněny i hodnoty z Pravidel provozování distribučních soustav, která přebírají většinu hodnot z této normy, ale uvádí i některé parametry, které u ČSN EN 50160 chybí.

### 2.1.1 Kmitočet sítě

Charakteristika kmitočtu sítě je v normě udána pro sítě nn, vn i vvn shodně. Jmenovitý kmitočet napájecího napětí je 50 Hz. Za normálních podmínek musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřená v intervalu 10 s v těchto mezích

- u systémů se synchronním připojením k propojenému systému:

50 Hz $\pm 1$ %	(tj. 49,5 Hz...50,5 Hz)	během 99,5% roku
50 Hz +4 %/-6 %	(tj. 47 Hz...52 Hz)	po 100 % času;

- u systémů bez synchronního připojení k propojenému systému (tj. ostrovní napájecí systémy):

50 Hz $\pm 2$ %	(tj. 49 Hz...51 Hz)	během 99,5% týdne
50 Hz $\pm 15$ %	(tj. 42,5 Hz...57,5 Hz)	po 100 % času.

### 2.1.2 Odchyly napájecího napětí

Za normálních podmínek, kromě období s přerušením, nemá odchylka napájecího napětí pro sítě nn přesáhnout  $\pm 10$  % jmenovitého napětí  $U_n$  a pro sítě vn  $\pm 10$  % dohodnutého napájecího napětí  $U_c$ .

V případech, kdy elektrické napájení v sítích není připojeno k přenosovým sítím nebo pro speciální dálkově ovládané uživatele, nemají odchylky napájecího napětí přesáhnout pro sítě nn  $(+10 \text{ %}/-15 \text{ %})U_n$  a pro vn a  $(+10 \text{ %}/-15 \text{ %})U_c$ . [8.]

Odchyly napájecího napětí pro sítě vvn norma neuvádí. Podle Pravidel provozování distribučních soustav (dále jen PPDS) nemají za normálních provozních podmínek s vyloučením přerušení napájení, odchylky napájecího napětí přesáhnout hodnoty z tab. 2.1. [9.]

Tab. 2.1 Mezní hodnoty odchylek napájecího napětí podle PPDS

Síť	Dovolený rozsah
110 kV	110 kV $\pm 10$ %
220 kV	220 kV $\pm 10$ %
400 kV	400 kV $\pm 5$ %

### 2.1.3 Rychlé změny napětí

Rychlé změny napájecího jsou většinou způsobeny buď změnami zátěže v instalacích uživatelů, spínáním v síti, nebo poruchami.

U sítí nn rychlé změny napětí během normálních provozních podmínek obecně nepřekračují 5 %  $U_n$ , ale za určitých okolností se mohou několikrát denně vyskytnout rychlé změny napětí až do 10 %  $U_n$ .

U sítí vn rychlé změny napětí za normálních provozních podmínek obecně nepřekračují 4 %  $U_c$ , ale během určitých okolností se mohou několikrát denně vyskytnout rychlé změny napětí až do 6 %  $U_c$ . [8.]

Podle PPDS nepřekročí za normálních provozních podmínek efektivní hodnota rychlé změny napětí  $\Delta u$  v závislosti na četnosti výskytu  $n$  hodnoty uvedené v tab. 2.2. [9.]

Tab. 2.2 Mezní hodnoty velikosti rychlých změn napětí podle PPDS

Četnost změn $n$	$\Delta U/U_n$ [%]	
	vn	vvn
$n \leq 4$ za den	5 - 6	3 - 5
$n \leq 2$ za hodinu a $> 4$ za den	4	3
$2 < n \leq 10$ za hodinu	3	2,5

### 2.1.4 Míra vjemu flikru

V důsledku kolísání napětí dochází ke změnám jasu svítidel, které mohou způsobovat zrakový vjem flikru. Flikr je definován jako vjem nestálosti zrakového vnímání vyvolaný světelným podnětem, u kterého jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase. Nad určitou prahovou hodnotou se stává nepříjemný. Nepříjemnost značně vzrůstá s amplitudou jeho kolísání. Již velmi malé amplitudy mohou být při určitém kmitočtu opakování nepříjemné.

Míra vjemu flikru – intenzita nepříjemnosti flikru je definovaná následujícími veličinami:

- krátkodobá míra vjemu flikru  $P_{st}$  je měřena po dobu deseti minut
- dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt}$  je vypočítána z posloupnosti dvanácti hodnot  $P_{st}$  po dobu dvouhodinového intervalu pomocí následujícího vztahu:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (2.1)$$

Norma udává shodně pro sítě nn, vn i vvn, že za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času v libovolném týdenním období dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt} \leq 1$ . [8.]

V PPDS je uvedeno, že v případě stížností a pokud je současně  $P_{st} > 1$ , musí být limit a současné snížení pro vvn, vn a nn zvoleno tak, aby hodnota  $P_{lt}$  pro nn nepřesáhla 1. [9.]

### 2.1.5 Nesymetrie napájecího napětí

Nesymetrie napětí je definována jako stav trojfázové sítě, při kterém efektivní hodnoty sdružených napětí nebo fázové úhly mezi po sobě jdoucími sdruženými napětími nejsou stejné. Míra nesouměrnosti je většinou vyjádřena jako poměr zpětné a nulové složky k sousledné složce. V normě ČSN EN 50160 se uvádí hodnoty pouze pro zpětnou složku, protože ta je pro rušení spotřebičů rozhodující.



Norma udává shodně pro sítě nn, vn i vvn, že za normálních provozních podmínek musí být 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozmezí 0 až 2 % sousledné složky.

### 2.1.6 Harmonická napětí

Harmonická napětí jsou sinusová napětí o kmitočtu, který je roven celistvému násobku základního kmitočtu napájecího napětí. Hlavní příčinou jejich vzniku jsou nelineární zatížení uživatelů sítě připojené do všech napětíových úrovní sítě. Harmonické proudy tekoucí impedancí sítě způsobují harmonická napětí. Harmonické proudy i impedance sítě a tudíž i harmonická napětí v odběrných místech se v průběhu času mění.

Harmonická napětí se mohou hodnotit jednotlivě podle jejich relativní amplitudy ( $u_h$ ), která je harmonickým napětím vztaheným k napětí základní harmonické  $u_1$ , kde  $h$  značí řád harmonické. Nebo souhrnně pomocí činitele celkového harmonického zkreslení THD (zahrnujícího všechny harmonické napětí do řádu 40) podle vztahu:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (2.2)$$

Podle normy ČSN EN 50160 musí být za normálních provozních podmínek v libovolném týdenním intervalu 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí všech jednotlivých harmonických napětí menší nebo rovno hodnotě, která je uvedena pro nn a vn v tab. 2.3 a pro vvn v tab. 2.4. Pro sítě vvn norma uvádí pouze informativní hodnoty. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší. Dále musí být pro sítě nn a vn celkový činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí menší nebo roven 8 %.

Tab. 2.3 Úrovně jednotlivých harmonických napětí pro sítě nn a vn v předávacím místě v procentech  $u_1$  pro řády harmonických až do 25

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Ne násobky 3		Násobky 3			
Řád harmonické $h$	Harmonické napětí $U_h$ [%]	Řád harmonické $h$	Harmonické napětí $U_h$ [%]	Řád harmonické $h$	Harmonické napětí $U_h$ [%]
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Tab. 2.4 Informativní hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro síť vvn v předávacím místě v procentech  $u_1$  pro řády harmonických až do 25

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Ne násobky 3		Násobky 3		Řád harmonické h	Harmonické napětí $U_h$ [%]
Řád harmonické h	Harmonické napětí $U_h$ [%]	Řád harmonické h	Harmonické napětí $U_h$ [%]		
5	5,0	3	3,0	2	1,9
7	4,0	9	1,3	4	1,0
11	3,0	15	0,5	6...24	0,5
13	2,5	21	0,5		
17	zkoumá se				
19	zkoumá se				
23	zkoumá se				
25	zkoumá se				

Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvažují, protože jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné. [8.]

Celkový činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí pro síť vvn norma neuvádí. Podle PPDS musí být THD (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) pro distribuční síť 110 kV menší nebo roven 8 %. [9.]

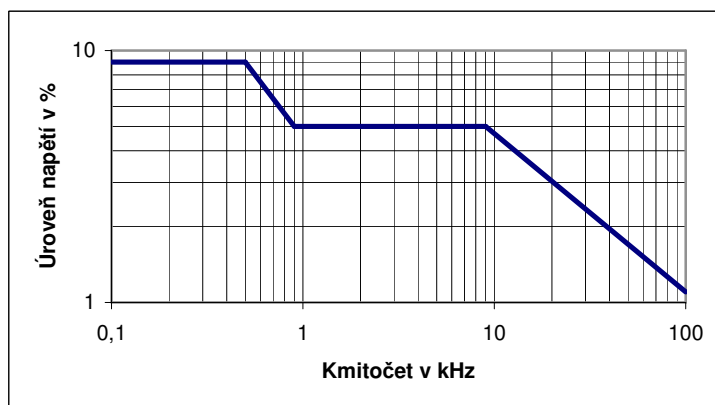
Pro porovnání s normou ČSN EN 50160 je uvedeno v kapitole 2.2 a 2.3 hodnocení harmonických z pohledu ČSN EN 61000-2-2 a ČSN EN 61000-2-4.

### 2.1.7 Meziharmonická napětí

Meziharmonická napětí jsou sinusová napětí o kmitočtu, který není roven celistvému násobku základního kmitočtu. S rozvojem měničů kmitočtu a podobných zařízení hladina meziharmonických stále narůstá. Hodnoty se v současné době studují a získávají se další zkušenosti. V určitých případech způsobují meziharmonické i nízkých úrovní v sítích nn a vn flickr nebo rušení v systémech hromadného dálkového ovládání HDO. U sítí vvn mají meziharmonické menší význam, je to z důvodu jejich nízkého rezonančního kmitočtu (200 Hz ... 500 Hz), který je způsoben vysokými kapacitami a indukčnostmi.

### 2.1.8 Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Veřejné síť mohou být v některých zemích využívány provozovateli sítě k přenosu informací. Z tohoto důvodu uvádí norma pro síť nn a vn, že střední hodnota napětí signálů měřeného po dobu tří sekund musí být v 99 % dne menší nebo rovna hodnotám z obr 2.1. Pro síť vvn neuvádí norma z důvodu jejich nízkého rezonančního kmitočtu žádné napětí signálů.



Obr. 2.1 Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech  $U_N$  pro nn a  $U_c$  pro vn veřejné distribučních sítí.

### 2.1.9 Přerušení napájecího napětí

Přerušení jsou podle svojí povahy velmi nepředvídatelné a různé od místa k místu a vzhledem k času. Pro celou dobu není možné stanovit reprezentativní statistické výsledky měření četnosti přerušení reprezentující všechny evropské sítě. Na četnost přerušení má vliv uspořádání vedení a působení vnějších a klimatických vlivů.

### 2.1.10 Poklesy a dočasná zvýšení napájecího napětí

Poklesy napětí jsou způsobovány poruchami v instalacích uživatelů nebo ve veřejné distribuční síti. Dočasná zvýšení napětí jsou způsobovány provozním spínáním, odpojováním zátěže, atd. Oba jevy jsou nepředvídatelné a mají převážně náhodný charakter. Jejich četnost výskytu za rok se značně mění podle typu napájecí sítě a místa sledování. Mimoto může být jejich rozložení během roku velmi nepravidelné. Obecně je prahová hodnota poklesu napětí rovna 90 % z referenčního napětí a prahová hodnota pro přechodné přepětí je rovna 110% referenčního napětí. Poklesy a dočasná zvýšení napětí se měří, zjišťují a vyhodnocují podle EN 61000-4-30. Tabulky pro klasifikaci poklesů a přechodných zvýšení napájecího napětí jsou uvedeny v normě ČSN EN 50160. [8.]

## 2.2 Harmonická napětí z pohledu ČSN EN 61000-2-2

Tato norma se týká rušení, která se šíří vedením v kmitočtovém rozsahu od 0 kHz do 9 kHz s rozšířením až do 148,5 kHz specificky pro systémy signálů ve veřejných rozvodných sítích. Uvádí se zde kompatibilní úrovně **pro veřejné distribuční sítě nízkého napětí**, které mají jmenovité fázové napětí až do 420 V nebo sdružené napětí 690 V a jmenovitý kmitočet 50 Hz

nebo 60 Hz. Veškeré kompatibilní úrovně, které jsou specifikovány v této normě platí pro společný napájecí bod.

V této normě se uvažují harmonické až do řádu 50 včetně. Kompatibilní úrovně se musí chápat jako vztažené ke kvazistacionárnímu nebo ustálenému stavu a jsou uvedeny jako referenční hodnoty pro dlouhodobé a krátkodobé účinky. Celkové harmonické zkreslení se vypočte podle vztahu:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left( \frac{Q_h}{Q_1} \right)^2} \quad (2.3)$$

kde  $Q$  představuje proud nebo napětí,  $Q_1$  je efektivní hodnota základní složky,  $h$  je řád harmonické,  $Q_h$  je efektivní hodnota harmonické složky řádu  $h$  a  $H$  se všeobecně rovná 50, ale může být i 25 je-li riziko rezonance na vyšších řádech nízké.

Dlouhodobé účinky se týkají hlavně tepelných účinků na kabely, transformátory, motory, kondenzátory atd. Jsou způsobeny úrovní harmonických, které trvají 10 minut nebo více. S ohledem na tyto účinky jsou kompatibilní úrovně pro jednotlivé harmonické složky napětí uvedeny v tab. 2.5. Odpovídající kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení je  $THD = 8 \%$ .

Velmi krátkodobé účinky se týkají hlavně rušivých účinků na elektronické přístroje, které mohou být citlivé na harmonické úrovně, jejichž doba trvání je menší nebo rovna 3 sekundám. Přechodné jevy nejsou zahrnuty. Pro tyto účinky jsou kompatibilní úrovně pro jednotlivé harmonické složky napětí hodnoty z tab. 2.5 násobené činitelem  $k$ . Výpočet  $k$  se provede podle vztahu:

$$k = 1,3 + \frac{0,7}{45} \cdot (h - 5) \quad (2.4)$$

Odpovídající kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení je  $THD = 11 \%$ . [10.]

Tab. 2.5 Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nn

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Ne násobky 3		Násobky 3			
Řád harmonické $h$	Harmonické napětí $U_h [\%]$	Řád harmonické $h$	Harm. napětí $U_h [\%]$	Řád harmonické $h$	Harmonické napětí $U_h [\%]$
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \cdot (17/h) - 0,27$	$21 < h \leq 49$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \cdot (10/h) + 0,25$

## 2.3 Harmonická napětí z pohledu ČSN EN 61000-2-4

Tato část normy IEC 61000 se týká rušení, která se šíří vedením v kmitočtovém rozsahu od 0 kHz do 9 kHz. Uvádí se zde číselné hodnoty kompatibilních úrovní **pro průmyslové a neveřejné střídavé distribuční sítě** jmenovitého napětí až do 35 kV a jmenovitého kmitočtu 50 Hz nebo 60 Hz. Nezahrnují se zde napájecí systémy na lodích, letadlech, plošinách mimo pevninu a na železnicích. Veškeré kompatibilní úrovně, které jsou specifikovány v této normě platí pro napájecí bod uvnitř závodu.

Na rozdíl od ČSN EN 61000-2-2 a ČSN EN 50160 je zde navíc i rozdělení do tří tříd elektromagnetického prostředí.

Třída 1. se týká chráněných napájení. Její kompatibilní úrovně jsou nižší než úrovně pro veřejné rozvodné sítě. To se týká použití zařízení velmi citlivého na rušení v síti, např. přístrojového vybavení laboratoří, některých automatizačních a ochranných zařízení, některých počítačů atd.

Třída 2. se všeobecně týká bodů PCC (společný napájecí bod – bod veřejné rozvodné sítě, elektricky nejbližší ke konkrétní zátěži, ve kterém jsou nebo mohou být připojeny jiné zátěže) a IPC (napájecí bod uvnitř závodu – napájecí bod uvnitř vyšetřované sítě nebo instalace, elektricky nejbližší ke konkrétní zátěži, ve kterém jsou nebo mohou být připojeny jiné zátěže) v prostředí průmyslových a jiných neveřejných napájecích sítí. V této třídě jsou kompatibilní úrovně shodné s úrovněmi pro veřejné rozvodné sítě. Proto zde mohou být použity prvky navržené pro napájení z veřejných rozvodných sítí.

Třída 3. se týká jenom bodů IPC v průmyslovém prostředí. V této třídě jsou kompatibilní úrovně pro některé jevy rušení vyšší než ve třídě 2. Tato třída by se měla například uvažovat, když je splněna jakákoliv z následujících podmínek: převážná část zatížení je napájena přes měniče, jsou provozovány svářečky, velké motory jsou často rozbíhány nebo zatížení se rychle mění.

I zde se uvažují harmonické až do řádu 50 včetně. Kompatibilní úrovně pro jednotlivé harmonické složky se musí chápat jako vztažené ke kvazistacionárnímu nebo ustálenému stavu a jsou uvedeny jako referenční hodnoty pro dlouhodobé a krátkodobé účinky. Celkové harmonické zkreslení se vypočte podle vztahu (2.3).

S ohledem na dlouhodobé účinky jsou kompatibilní úrovně pro jednotlivé harmonické složky napětí jsou uvedeny v tab. 2.6 až tab. 2.8. Odpovídající kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení jsou uvedeny v tab. 2.9.

S ohledem na velmi krátkodobé účinky ve třídě 1 a 3 jsou kompatibilní úrovně pro jednotlivé harmonické složky napětí a pro celkové harmonické zkreslení 1,5 násobkem hodnot uvedených v tab. 2.6 až tab. 2.9. Kompatibilní úrovně ve třídě 2 pro jednotlivé harmonické složky napětí jsou hodnoty z tab. 2.6 až tab. 2.8 násobené činitelem  $k$ , který se vypočte ze vztahu (2.4). Odpovídající kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení ve třídě 2 je 8 %. [11.]

Tab. 2.6 Kompatibilní úrovně pro harmonické lichého řádu mimo násobku tří

Řád h	Třída 1 $U_h$ [%]	Třída 2 $U_h$ [%]	Třída 3 $U_h$ [%]
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
$17 < h \leq 49$	$2,27 \cdot (17/h) - 0,27$	$2,27 \cdot (17/h) - 0,27$	$4,5 \cdot (17/h) - 0,5$

Tab. 2.7 Kompatibilní úrovně pro harmonické lichého řádu, které jsou násobkem tří

Řád h	Třída 1 $U_h$ [%]	Třída 2 $U_h$ [%]	Třída 3 $U_h$ [%]
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2
21	0,2	0,3	1,75
$21 < h \leq 45$	0,2	0,2	1

Tab. 2.8 Kompatibilní úrovně pro harmonické složky napětí sudého řádu

Řád h	Třída 1 $U_h$ [%]	Třída 2 $U_h$ [%]	Třída 3 $U_h$ [%]
2	2	2	3
4	1	1	1,5
6	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	1
$10 < h \leq 50$	$0,25 \cdot (10/h) + 0,25$	$0,25 \cdot (10/h) + 0,25$	1

Tab. 2.9 Kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení

	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Celkové harmonické zkreslení THD [%]	5	8	10

### 3 Technické prostředky pro monitorování kvality elektrické energie

#### 3.1 Požadavky na přístroje pro měření kvality elektrické energie

Podle PPDS musí být analyzátory kvality napětí v předacích místech mezi přenosovou soustavou (ČEPS) a distribučními společnostmi přednostně třídy A (přesnost měření napětí do 0,1 %) a musí být schopny měřit tyto parametry kvality v trojfázové síti:

- a) kmitočet sítě
- b) velikost napájecího napětí
- c) odchylky napájecího napětí
- d) rychlé změny napětí
  - velikost rychlých změn napětí
  - míra vjemu flikru
- e) krátkodobé poklesy napájecího napětí
- f) nesymetrie napájecího napětí
- g) harmonická napětí
- h) meziharmonická napětí
- i) úroveň napětí signálů v napájecím napětí
- j) krátkodobá přerušení napájecího napětí
- k) dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- l) dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- m) přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí

Dále musí být analyzátory schopny měřit velikosti proudů a z nich odvozených (podle přiřazených napětí) dalších veličin:

- a) činný výkon
- b) zdánlivý výkon
- c) jalový výkon
- d) harmonické

V předacích místech distribuční sítě a společných napájecích bodech s regionálními výrobci se přednostně použijí analyzátory třídy S (přesnost měření napětí do 1 %). V případě potřeby kontrolního měření se použijí analyzátory třídy A. Třídy přesnosti jsou podle normy ČSN EN 61000-4-30. [9.]

## 3.2 Systém BK-ELCOM pro monitorování a analýzu kvality elektrické energie

Systém BK-ELCOM je komplexní modulární systém pro monitorování a analýzu kvality elektrické energie, založený na bázi technologie virtuální instrumentace. Využívá grafické vývojové prostředí LabVIEW pro jeho schopnost pružně reagovat na měnící se požadavky koncových uživatelů. Má otevřený rámec pro implementaci dalších softwarových modulů. Do operačního systému, ve kterém běží firmware analyzátoru, lze přidávat další aplikace (např. software pro zpracování protokolů z měření). Umožňuje trvalé dokumentování a analýzu kvality elektrické energie ve vybraných místech rozvodné soustavy. Naměřené hodnoty jsou z jednotlivých míst měření přenášeny na centrální databázový server. Uživatel může z běžného počítače pomocí webového prohlížeče prohlížet data z libovolného monitorovacího místa pro zvolený časový interval.

Výhodou systému BK-ELCOM je použití standardních technologií z oblasti počítačových sítí (SQL server, ODBC rozhraní, TCP/IP protokol) a možnost on-line dálkové správy jednotek.

Firmware respektuje tyto normy a související dokumenty platné k lednu 2005: ČSN EN 6100-4-7, ČSN EN 6100-4-15, ČSN EN 50160, ČSN EN 61000-4-30, PNE 33 3430, PPDS, příloha 3 a PPPS, část 5.

Uživatel si může vybrat ze sady přístrojů ty, které odpovídají jeho požadavkům, aniž by musel zasahovat do hardwarové podoby přístroje. Sada přístrojů obsahuje:

- a) analyzátor harmonických a mezipharmonických
- b) monitor výkonu a energií
- c) osciloskop
- d) vektoroskop
- e) měřič blikání
- f) monitor napětí podle normy ČSN EN 50160
- g) transientní zapisovač
- h) analyzátor signálu HDO
- i) analyzátor symetrických složek sítě
- j) analyzátor impedance sítě
- k) monitor alarmů
- l) monitor efektivní hodnoty napětí za půlperiodu

Analyzátor sítí tvořící základ systému je nabízen v různých hardwarových provedeních pro stacionární i mobilní monitoring. V následujících kapitolách jsou popsány provedení ENA400, ENA500.xx, PNA560 a PNA600. [14.] [15.] [16.]

### 3.2.1 Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA400

Model ENA400 je stacionární analyzátor vhodný pro trvalou instalaci na rozvodnách. Skládá z PC umístěného v průmyslové skříni určené pro montáž do 19“ rámu a až dvou externích jednotek pro úpravu signálu BK-SCM-01A, určených pro montáž na 35mm DIN lištu. Jeden



modul slouží pro úpravu až 16-ti analogových signálů (např. 5 x 3U) a poskytuje volitelně až 64 digitálních vstupů.

Systém není vybaven displejem. Pro konfiguraci je možné použít dálkové správy přes počítačovou síť (volitelně bezdrátový Ethernet), modem nebo připojení standardních periférií k servisním rozhraním (monitor, klávesnice, myš).

Vstupní rozsahy modulu BK-SCM-01A jsou navrženy pro aplikace měření kvality elektrické energie, které nejčastěji pracují s výstupními signály z měřicích transformátorů napětí (57 V a 100 V) a z měřicích transformátorů proudu (1 A a 5 A). Hodnota měřitelného přetížení pro napěťový a proudový vstup je 200 % jmenovitého rozsahu. Přesnost měření napětí a proudu je lepší než  $\pm 0,1$  %. Přepětová ochrana napěťového modulu je 1 kV<sub>RMS</sub> a izolační pevnost napěťového a proudového modulu je 4,2 kV, 50 Hz po dobu 1 minuty.

Modul digitálních vstupů a výstupů umožňuje zpracování diskretních signálů s úrovní 24 V DC. Digitální moduly mají izolační pevnost 1,5 kV.



*Obr. 3.1 Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA400*

### 3.2.2 Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA500.xx

Analyzátor ENA500.xx je umístěn v přenosné mechanicky odolné skříni. Uvnitř přístroje je zabudováno výkonné PC. Rozšiřitelnost je zajištěna rozhraními Ethernet, 2 x COM a 2 x USB. Pracovní teplota je od  $-25$  do  $+50$  °C. ENA500 se vyrábí v provedeních ENA500.11, ENA500.12, ENA500.13, ENA500.14, ENA500.22 a ENA500.50.

V jednom přístroji je možné analyzovat až pět třífázových systémů v různých kombinacích podle druhu provedení (např. ENA500.12 má jeden napěťový a dva proudové systémy, každý o čtyřech měřených kanálech). Firmware analyzátoru může být řešen formou multisystému, kdy si uživatel přepíná mezi analyzovanými třífázovými systémy.

Vstupní rozsahy napěťových kanálů jsou 65, 110, 250 a 450 V AC. Analyzátor měří do hodnoty 600 V<sub>RMS</sub>. Modul má přepětovou ochranu 1 kV<sub>RMS</sub> a izolační pevnost 4,2 kV, 50 Hz po dobu 1 minuty. Přesnost modulu je lepší než  $\pm 0,1$  %.

Vstupní rozsahy proudových kanálů jsou dány připojením proudových kleští s napěťovým výstupem nebo kleští Ampflex, pro které má analyzátor zabudovány zesilovače jejich výstupního signálu. Přesnost je při použití kleští MN71 lepší než  $\pm 0,1$  %.

Napěťové i proudové kanály mají rozsahy přepínatelné softwarově, antialiasing filtr na vstupu s frekvencí řezu 3 kHz a šířku měřeného pásma modulu od 50 Hz do 2,5 kHz.



Obr. 3.2 Analyzátor BK-ELCOM v provedení a) ENA500.12 a b) ENA500.13

### 3.2.3 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA560

Základní systém modelu PNA560 tvoří výkonné průmyslové PC zabudované v odolném plastovém kufříku. Z hlediska odolnosti proti vibracím, nárazům a vlhkosti vyhovuje americké vojenské normě MIL-STD 810C a také evropské specifikaci CE. Pracovní teplota je od  $-10$  do  $+50$  °C. Rozměry jsou 340 x 145 x 290 mm a hmotnost je 4 kg.

Systém je standardně vybaven dotykovým displejem, kterým lze sledovat výsledky měření ovládat přístroj. Přístroj je vybaven rozhraním USB.

Vstupní rozsahy napěťových kanálů jsou 50, 100, 300 a 600 V AC. Vstupní rozsahy pro čtvrtý napěťový kanál jsou 5, 10, 50, 100 V AC. Modul má přepětovou ochranu je 1 kV<sub>RMS</sub> a izolační pevnost 6 kV, 50 Hz po dobu 1 minuty. Přesnost je lepší než  $\pm 0,5$  %.

Vstupní rozsahy proudových kanálů jsou 1 A nebo 5 A pro přímý proudový vstup, další alternativou je připojení proudových kleští s napěťovým výstupem nebo kleští Ampflex, pro které má analyzátor zabudovány zesilovače jejich výstupního signálu. Přesnost je lepší než  $\pm 0,5$  %.

Napěťové i proudové kanály mají rozsahy přepínatelné softwarově, antialiasing filtr na vstupu s frekvencí řezu 3 kHz a šířku měřeného pásma modulu od 50 Hz do 2,5 kHz.



Obr. 3.3 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA560

### 3.2.4 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA600

Analyzátor v provedení PNA600 navržený pro měření v terénu má oddělenou měřicí a zobrazovací část. Výhodou tohoto provedení je, že po nakonfigurování analyzátoru lze periférii za chodu odpojit to znamená, že stačí jedna konfigurační a zobrazovací jednotka pro práci s více analyzátory. Měřicí jednotka má krytí IP65. Teplo z pracovního prostoru je vyváděno přes tepelný výměník v podobě měděného profilu. Rozměry základní jednotky jsou 360 x 285 x 80 mm a hmotnost je 4 kg. Pracovní teplota se pohybuje od  $-20$  do  $+50$  °C.

Stejně jako u všech ostatních provedení i zde tvoří základní systém výkonné PC. Rozšiřitelnost je zajištěna rozhraními Ethernet, 2 x COM a USB.

Vstupní rozsahy napěťových kanálů jsou 50, 100, 300 a 600 V AC, vstupní rozsahy pro čtvrtý napěťový kanál jsou 5, 10, 50 a 100 V AC. Modul má přepětovou ochranu 1 kV<sub>RMS</sub> a izolační pevnost 6 kV, 50 Hz po dobu 1 minuty. Přesnost je lepší než  $\pm 0,5$  %.

Vstupní rozsahy proudových kanálů jsou dány připojením proudových kleští s napěťovým výstupem nebo kleští Ampflex, pro které má analyzátor zabudovány zesilovače jejich výstupního signálu. Přesnost je lepší než  $\pm 0,5$  %.

Napěťové i proudové kanály mají rozsahy přepínatelné softwarově, antialiasing filtr na vstupu s frekvencí řezu 3 kHz a šířku měřeného pásma modulu od 50 Hz do 2,5 kHz. [15.] [16.]



*Obr. 3.4 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA600*

### 3.3 Analyzátor Fluke 435 řady II

Analyzátor Fluke 435 se vyznačuje robustní mechanicky odolnou konstrukcí s vestavěným ochranným pouzdrem. Přístroj měří prakticky všechny požadované parametry včetně napětí, proudu, frekvence, výkonu, spotřeby energie, nesymetrie, flikru, harmonických, mezipharmonických a rušení signály HDO. Zachycuje události, jako jsou přechodná přepětí, poklesy napětí, přerušení napájecího napětí a rychlé změny napětí. Přístroj vyhovuje standardům měření IEC 61000-4-30 třídy A. Kromě analýzy kvality elektrické energie je schopen i finančního vyjádření energetických ztrát. Z měření činného a jalového výkonu, nesymetrie a harmonických vyhodnotí skutečné energetické ztráty v nastavené měně. Přístroj je

vybaven rozhraním USB a slotem pro SD kartu. Stupeň krytí je IP51. Baterie vydrží na jedno nabití 7 hodin provozu. Provozní teplota je od 0 do +40 °C.

Rozsah měření napětí je do 1000 V<sub>RMS</sub>. Fluke 435 má automatický přechodný režim, ve kterém je schopen zachytit křivky 200 kHz ve všech fázích současně až do hodnoty 6 kV. Rozsah měření proudu může být podle typu použitých proudových kleští až do 6000 A. Analyzátor umožňuje současně měřit napětí a proud ve všech třech fázích a nulovém vodiči. Každé měření je vždy automaticky a nepřetržitě zaznamenáváno bez nutnosti nastavování prahových úrovní a časových intervalů. Pomocí funkce AutoTrend může uživatel v reálném čase sledovat vývoj měřených veličin. Může také provádět analýzu pomocí kurzorů a nástroje zoom. Funkce „Systémový monitor“ poskytuje přehled měřených parametrů a kontroluje zda odpovídají úrovním podle EN 50160 nebo jiným nastaveným specifikacím. Měření harmonických a meziharmonických je v souladu s normou IEC 61000-4-7. Měření flikru je v souladu s normou IEC 61000-4-15. [17.] [18.]



Obr. 3.5 Analyzátor Fluke 435 řady II

### 3.4 Analyzátor Fluke 1760 Topas

Přístroj Fluke 1760 je vhodný pro analýzu rozvodných a průmyslových energetických distribučních systémů a jejich dlouhodobé monitorování. Má synchronizaci času přes GPS, díky toho umožňuje přesnou korelaci dat s událostmi nebo datovými sadami z jiných přístrojů. Měří ve všech třech fázích současně prakticky všechny požadované parametry včetně efektivní hodnoty napětí a proudu, flikru, nesymetrie, harmonických, meziharmonických, THD, výkonu, účinníku a rušení signály HDO. Zachycuje události, jako jsou přechodná přepětí, poklesy napětí, přerušování napájecího napětí a rychlé změny napětí. Poskytuje statistickou analýzu kvality elektrické energie v souladu s normou EN 50160. Díky vnitřní baterii je přístroj schopen překlenout 40 minut bez napájení. Přístroj je vybaven rozhraním RS 232 a Ethernet. Rozměry jsou 325 x 300 x 65 mm a hmotnost je 4,9 kg. Pracovní teplota je od -20 do +50 °C.

Fluke 1760 plně vyhovuje standardům měření IEC 61000-4-30 třídy A. Má 8 vstupních galvanicky oddělených kanálů pro měření napětí a proudu. Maximální trvalé vstupní napětí je

1000 V<sub>RMS</sub>. Přístroj nabízí režim měření rychlých přechodových jevů s rozsahem měření do 6 kV, ve kterém je schopen zachytit velmi krátké impulsy, jako jsou údery blesku. Rozsah měření proudu může být podle typu použitých proudových kleští až do 6000 A. Měření harmonických a meziharmonických je v souladu s normou IEC 61000-4-7. Měření flikru je v souladu s normou IEC 61000-4-15. [17.] [19.]



Obr. 3.6 Analyzátor Fluke 1760 Topas

### 3.5 Analyzátor C.A 8335 QUALISTAR PLUS

Analyzátor sítí C.A 8335 je přenosný přístroj pro měření, monitorování a diagnostiku elektrických sítí. Vyhovuje požadavkům pro třídu přesnosti A. Měří hodnoty jednotlivých harmonických až do řádu 50 včetně jejich fázového posunu vůči základní harmonické. Vypočítává THD, flikr a nesymetrii. Provádí výkonovou analýzu s měřením činného, zdánlivého a jalového výkonu, energie a účinníku. Umožňuje současně měřit napětí a proud ve všech třech fázích a nulovém vodiči. Uživatel může v reálném čase sledovat průběh měřených veličin. Režim sledování přechodných dějů umožňuje zachytit přerušení dodávky elektrické energie, špičky, zapínací proudy apod. Přístroj je vybaven komunikačním rozhraním USB. Rozměry jsou 240 x 180 x 55 mm a hmotnost je 1,9 kg. Provozní teplota je od 0 do +50 °C.

Rozsah měření proudu může být podle typu použitých proudových kleští až do 6500 A. Rozsah měření napětí je do 1000 V<sub>RMS</sub>. Firmware přístroje respektuje normy IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15 a EN 50160. [20.] [21.]



Obr. 3.7 Analyzátor C.A 8335 QUALISTAR PLUS

### 3.6 Analyzátor C.A 8352

Model C.A 8352 měří všechny parametry nutné ke kompletní analýze třífázových elektrických sítí včetně kmitočtu sítě, velikosti napájecího napětí, rychlých a pomalých změn napětí, přerušení napájecího napětí, poklesů napětí, dočasných zvýšení napětí a rušení signály HDO. Měří hodnoty jednotlivých harmonických až do řádu 50, včetně jejich fázového posunu vůči základní harmonické. Vypočítává THD, flickr a nesymetrii. Provádí výkonovou analýzu s měřením činného, zdánlivého a jalového výkonu, energie a účinníku. Vyznačuje se velkou vnitřní pamětí 10 GB HDD a 256 MB RAM. Je vybaven 10“ dotykovým displejem, který plní funkci ovládacího panelu. Nabízí možnost externí synchronizace času. Umožňuje přenos dat přes USB, modem nebo Ethernet. Je umístěn v mechanicky odolném kufříku. Stupeň krytí je IP43. Rozměry jsou 360 x 300 x 150 mm a hmotnost je 4 kg. Provozní teplota je od -10 do +50 °C.

C.A 8352 má 4 proudové a 4 napěťové vstupy. Nabízí 3 volitelné proudové převodníky pro měření od 0,2 A do 3000 A. Rozsah měření napětí je do 2 kV špička-špička. Metody analýzy jsou v souladu s normami EN 50160, EN 61000-4-15 a EN 61000-4-30. [20.] [22.]



*Obr. 3.8 Analyzátor C.A 8352*

### 3.7 Univerzální monitor MEG4 MEG40

MEG40 je univerzální měřicí přístroj, určený pro měření v sítích nn, vn a vvn. Slouží k měření napětí, proudu, výkonu a vyhodnocování energií. Zaznamenává časové průběhy měřených veličin, průměrné hodnoty, maxima a minima. Může vyhodnocovat 1/4 hodinová maxima fázových proudů a zaznamenávat denní diagramy proudů ve zvolené dny. Zaznamenává přerušení, poklesy a zvýšení napájecího napětí. MEG40 plní také funkci elektroměru. Měřené veličiny zobrazuje na zabudovaném LCD displeji. Měřicí režimy a převodní konstanty prvků měřicího řetězce je možné programovat pomocí klávesnice monitoru nebo pomocí PC. Dodávaným programem lze provést statistické vyhodnocení



a analýzu provozních podmínek. Je vybaven rozhraním USB 2.0. Rozměry jsou 90 x 90 x 90 mm a hmotnost je 0,6 kg. Stupeň krytí čelního panelu je IP40 a ostatních částí IP20. Pracovní teplota je od -25 do +55 °C. Odchytky a události na napětí měří v souladu s ČSN EN 50160 a podle algoritmů ČSN EN 61000-4-30 ed.2, třída S. [23.]



Obr. 3.9 Univerzální monitor MEGa MEG40

### 3.8 Elektroměr Landis+Gyr E850 ZMQ200

V současnosti jsou schopny měřit kvalitu elektrické energie i některé elektroměry. Jedním z nich je elektroměr pro vysokonapěťové sítě Landis+Gyr E850 ZMQ200. Tento elektroměr měří napětí, proud, frekvenci, fázový úhel, nesymetrii napětí a proudu, THD, výkon, zdánlivou energii a účinník. Vypočítává ztráty na vedení a transformátoru. Zaznamenává poklesy napětí (DIP tabulka). Má paměť pro záznam až 256 provozních událostí. Umožňuje zobrazení okamžitých měřených hodnot. Zaznamenává současně hodnoty až z 36 měřicích kanálů. Je vybaven přídatným napájením, umožňujícím dálkový odečet elektroměru při výpadku napájení. Komunikace s elektroměrem může být realizovaná volitelně přes rozhraní RS232, rozhraní RS485, PSTN modem, GSM modem, Ethernet TCP/IP nebo GSM/GPRS modul. Vyrábí se v provedení f6 určené pro montáž na stěnu a v provedení f9 určené pro montáž do skříní a panelů. Provozní teplota je od -25 do +55 °C. [24.]



Obr. 3.10 Elektroměr Landis+Gyr E850 ZMQ200

### 3.9 Elektroměr Itron ACE8000

Elektroměr Itron ACE8000 je určen pro potřeby elektráren, přenosových sítí a náročných průmyslových aplikací. Kromě měření spotřeby elektrické energie umožňuje měřit efektivní hodnoty proudu a napětí, frekvenci, THD a fázový posun. Monitoruje a zaznamenává přerušení, poklesy a zvýšení napájecího napětí. Na přání může být vybaven grafickým LCD displejem. Provádí signalizaci alarmů pomocí SMS nebo emailu. Vypočítává a zaznamenává ztráty na mědi a železe. Nabízí až čtyři komunikační porty 2 x RS232 a 2 x RS485 nebo RS232/RS485, optický port a datový port. Uživatel má možnost výběru z protokolů DLMS COSEM, TCP/IP, IEC 62056-21 nebo DL/T645. Elektroměr je vybaven záložním napájením. [25.]



*Obr. 3.11 Elektroměr Itron ACE8000*



## 4 Analýza dat

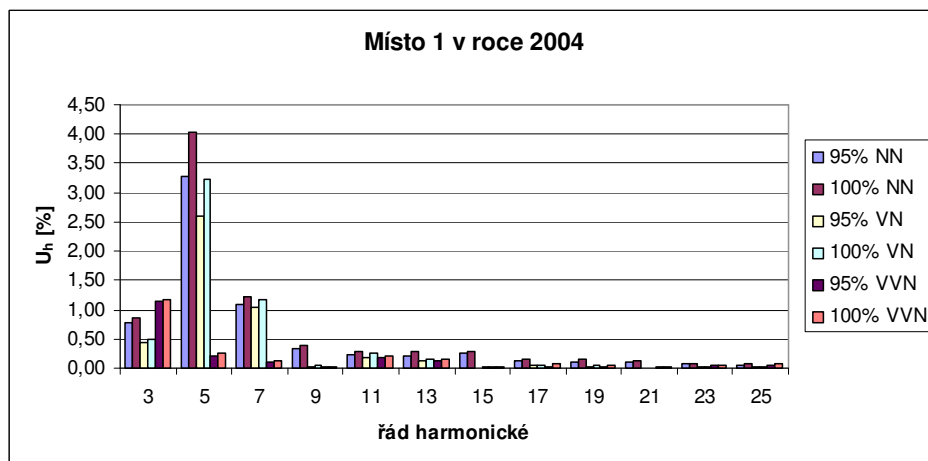
Zpracování a následné vyhodnocení naměřených dat tvoří významnou fázi zjištění kvality elektrické energie. Samotné měření bylo provedeno na pěti místech, na hladinách nn, vn a vvn v letech 2004, 2007 a 2011. K měření byly použity analyzátory sítí BK-ELCOM. Ke zpracování naměřených dat je možné použít program BK-REPORT, který je dodáváný spolu s analyzátozem. Vzhledem k povaze dat je ovšem ideální použít k jejich zpracování tabulkový procesor. V tomto případě byl použit program MS Excel. Pro analýzu byla zvolena jednotlivá lichá harmonická napětí až do 25. řádu, činitel celkového harmonického zkreslení THD, flikr a nesymetrie. Data byla vyhodnocena v souladu s normou ČSN EN 50160. Limitní hodnoty z této normy jsou pro porovnání uvedeny v tabulkách pro jednotlivá měřená místa. Kromě 95% hodnot, které požaduje norma ČSN EN 50160, a které jsou uvedeny v tabulkách jsou pro srovnání vykresleny v grafech i 100% hodnoty.

### 4.1 Analýza dat z místa 1

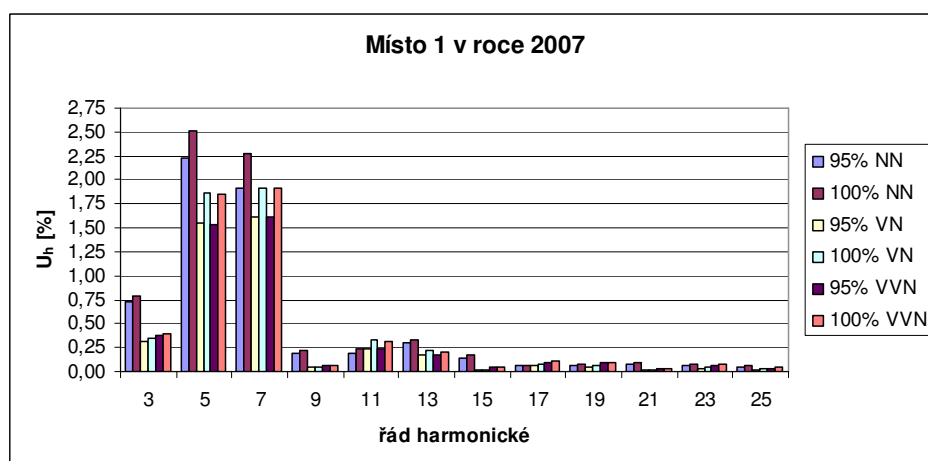
Měření proběhla v obdobích od 28.10. do 12.11.2004, od 21.12.2007 do 9.1.2008 a od 22.10. do 10.11.2011. Pro analýzu byly vybrány intervaly od 1.11. do 7.11.2004 (Po-Ne), od 24.12. do 30.12.2007 (Po-Ne) a od 31.10. do 6.11.2011 (Po-Ne). Nejvyšší úroveň harmonického napětí vyšla pro 5. harmonickou na hladině NN v roce 2004 ( $U_{h5} = 3,2728 \%$ ). Hodnoty THD,  $P_{it}$  a nesymetrie byly taktéž na této hladině a v tomto roce nejvyšší (THD = 3,4367 %,  $P_{it} = 0,2531$  a  $N = 0,4283 \%$ ). Nicméně žádná z těchto hodnot nepřekročila limity dané normou a na přiložených grafech (obr. 4.1 až obr. 4.6) je vidět, že i 100% hodnoty se do těchto limitů vešly.

Tab. 4.1 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 1

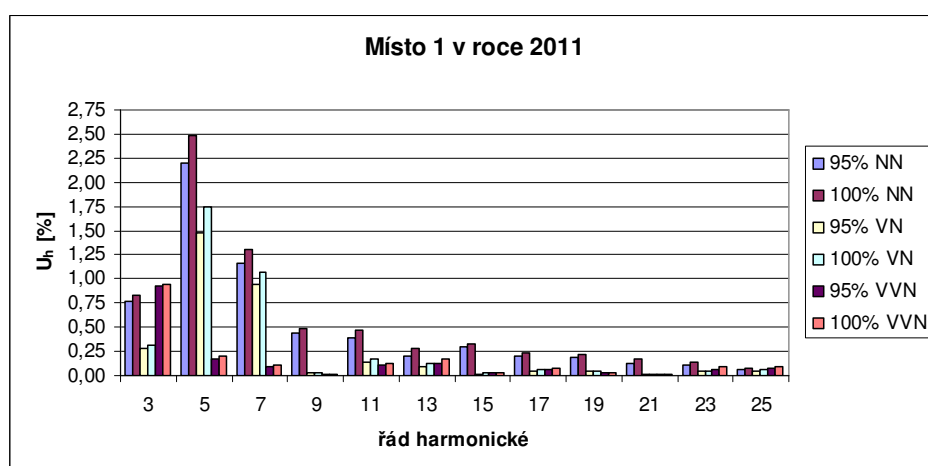
		NN				VN				VVN			
		2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma
$U_h [\%]$	3	0,7700	0,7334	0,7738	5,0	0,4453	0,3214	0,2825	5,0	1,1340	0,3749	0,9267	3,0
	5	3,2728	2,2305	2,2005	6,0	2,6049	1,5538	1,4791	6,0	0,2035	1,5354	0,1693	5,0
	7	1,0846	1,9074	1,1580	5,0	1,0439	1,6156	0,9454	5,0	0,0970	1,6072	0,0867	4,0
	9	0,3333	0,1917	0,4453	1,5	0,0304	0,0398	0,0251	1,5	0,0271	0,0598	0,0138	1,3
	11	0,2454	0,1955	0,3897	3,5	0,1940	0,2414	0,1465	3,5	0,1848	0,2345	0,1033	3,0
	13	0,2145	0,2963	0,2081	3,0	0,1245	0,1711	0,0948	3,0	0,1186	0,1744	0,1310	2,5
	15	0,2571	0,1414	0,2926	0,5	0,0115	0,0199	0,0189	0,5	0,0205	0,0454	0,0276	0,5
	17	0,1262	0,0573	0,2104	2,0	0,0411	0,0667	0,0487	2,0	0,0381	0,0973	0,0596	neuvádí
	19	0,1154	0,0648	0,1919	1,5	0,0338	0,0537	0,0395	1,5	0,0325	0,0875	0,0276	neuvádí
	21	0,1133	0,0815	0,1205	0,5	0,0086	0,0173	0,0188	0,5	0,0219	0,0296	0,0215	0,5
	23	0,0661	0,0619	0,1094	1,5	0,0243	0,0362	0,0424	1,5	0,0513	0,0573	0,0660	neuvádí
	25	0,0568	0,0457	0,0683	1,5	0,0224	0,0220	0,0430	1,5	0,0533	0,0368	0,0726	neuvádí
THD [%]		3,4367	2,8301	2,5611	8,0	2,6848	2,0962	1,7290	8,0	1,0910	2,0852	0,9547	neuvádí
$P_{it} [-]$		0,2531	0,1828	0,2443	1,0	0,2402	0,1402	0,1652	1,0	0,1586	0,1517	0,1757	1,0
$N [\%]$		0,4283	0,4167	0,3506	2,0	0,3529	0,3807	0,3149	2,0	0,3175	0,3347	0,3808	2,0



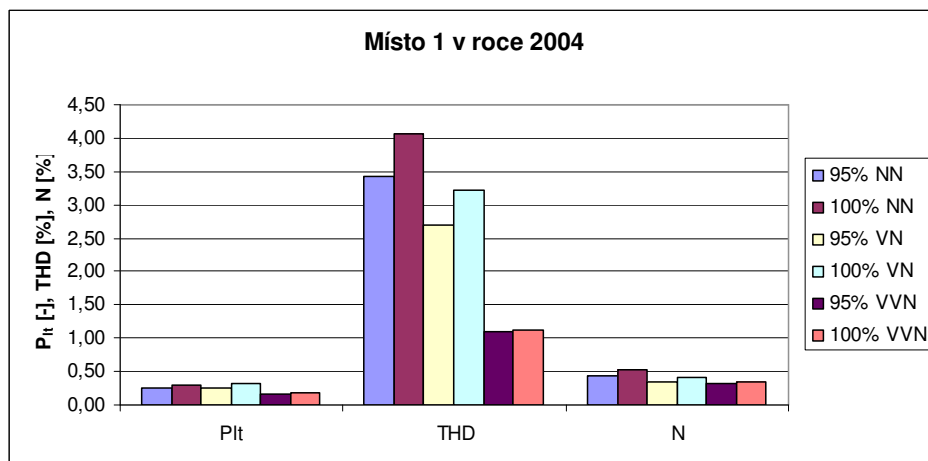
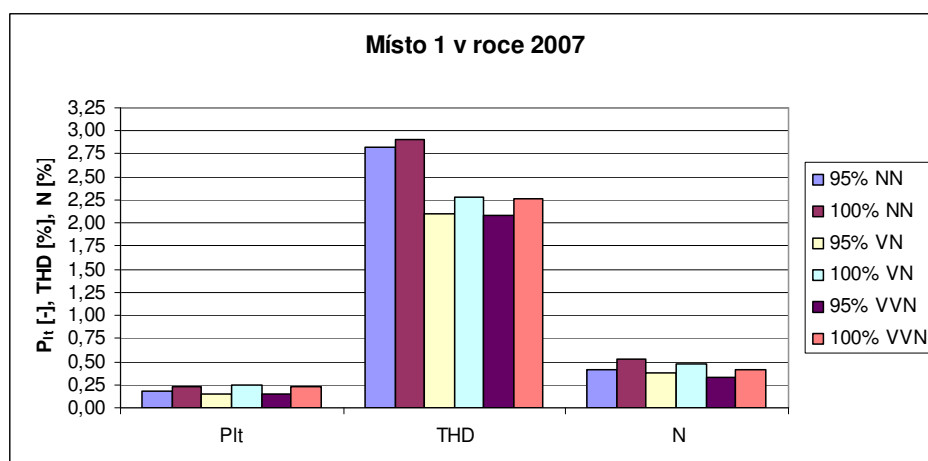
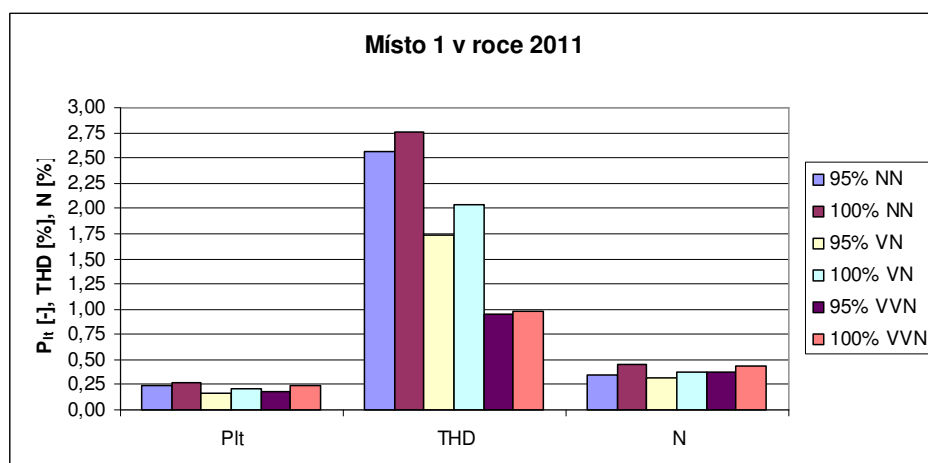
Obr. 4.1 Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 1 v roce 2004



Obr. 4.2 Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 1 v roce 2007



Obr. 4.3 Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 1 v roce 2011

Obr. 4.4 Hodnoty  $P_{It}$ , THD a nesymetrie pro místo 1 v roce 2004Obr. 4.5 Hodnoty  $P_{It}$ , THD a nesymetrie pro místo 1 v roce 2007Obr. 4.6 Hodnoty  $P_{It}$ , THD a nesymetrie pro místo 1 v roce 2011

## 4.2 Analýza dat z místa 2

Měření proběhla v obdobích od 18.12.2004 do 6.1.2005, od 22.11. do 7.12.2007 a od 7.10 do 20.10.2011. Pro analýzu byly vybrány intervaly od 27.12.2004 do 2.1.2005 (Po-Ne), od 26.11. do 2.12.2007 (Po-Ne) a od 10.10. do 16.10.2011 (Po-Ne). Nejvyšší úroveň harmonického napětí vyšla pro 5. harmonickou na hladině NN v roce 2011 ( $U_{h5} = 2,1176 \%$ ). Hodnota THD byla také na této hladině a v tomto roce nejvyšší (THD = 2,2729 %). Dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{fl}$  byla nejvyšší na hladině VVN v roce 2011 ( $P_{fl} = 0,5066$ ). Nejvyšší hodnota nesymetrie vyšla pro hladinu VN v roce 2004 ( $N = 0,6021 \%$ ). Nutno podotknout, že k vyhodnocení chyběly hodnoty z měření nesymetrie na hladině VN v roce 2007 a na hladině VVN v letech 2004 a 2007. Pro hladinu VVN v letech 2004 a 2007 chyběly hodnoty nesymetrie z důvodu, že byla měřena pouze jedna fáze, tudíž i ostatní parametry byly vyhodnocovány pro jednu fázi. V tomto místě se také 95% i 100% hodnoty vešly do limitů daných normou. Příslušné grafy jsou přiloženy v příloze č.1.

Tab. 4.2 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 2

		NN				VN				VVN			
		2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma
$U_h$ [%]	3	0,7118	0,9844	0,6415	5,0	0,2623	0,1377	0,2353	5,0	0,7977	0,6971	0,2739	3,0
	5	1,9826	1,5063	2,1176	6,0	1,3431	0,7346	1,8512	6,0	0,9478	0,9886	1,2456	5,0
	7	1,1390	0,6220	0,7539	5,0	0,9866	0,3104	0,6177	5,0	0,9897	0,6290	0,5381	4,0
	9	0,3454	0,4947	0,2965	1,5	0,0650	0,0277	0,0400	1,5	0,3461	0,2006	0,0227	1,3
	11	0,3301	0,4607	0,2961	3,5	0,1428	0,1359	0,1643	3,5	0,1393	0,2033	0,2622	3,0
	13	0,2252	0,2603	0,1976	3,0	0,1642	0,1148	0,1150	3,0	0,0942	0,1481	0,1873	2,5
	15	0,1716	0,2506	0,1428	0,5	0,0433	0,0223	0,0306	0,5	0,0231	0,0722	0,0309	0,5
	17	0,1248	0,1439	0,0916	2,0	0,0505	0,0516	0,0633	2,0	0,0170	0,0886	0,1401	neuvádí
	19	0,0737	0,0937	0,0763	1,5	0,0479	0,0345	0,0549	1,5	0,0144	0,0767	0,1387	neuvádí
	21	0,0524	0,0523	0,0396	0,5	0,0382	0,0206	0,0178	0,5	0,0162	0,0830	0,0353	0,5
	23	0,0565	0,0742	0,0482	1,5	0,0482	0,0418	0,0651	1,5	0,0150	0,0803	0,1824	neuvádí
	25	0,0406	0,0562	0,0339	1,5	0,0428	0,0280	0,0452	1,5	0,0114	0,0847	0,1256	neuvádí
THD [%]		2,2247	1,8520	2,2729	8,0	1,5754	1,1385	1,9210	8,0	1,5103	1,3044	1,3694	neuvádí
$P_{fl}$ [-]		0,2699	0,3916	0,4363	1,0	0,3018	0,3857	0,4391	1,0	0,3057	0,4748	0,5066	1,0
$N$ [%]		0,3340	0,2522	0,3272	2,0	0,6021	–	0,2478	2,0	–	–	0,2262	2,0

### 4.3 Analýza dat z místa 3

Měření proběhla v obdobích od 2.12 do 17.12.2004, od 8.12 do 20.12.2007 a od 23.9. do 6.10.2011. Pro analýzu byly vybrány intervaly od 2.12. do 8.12.2004 (Čt-St), od 10.12. do 16.12.2007 (Po-Ne) a od 26.9. do 2.10.2011 (Po-Ne). Nejvyšší úroveň harmonického napětí vyšla pro 3. harmonickou na hladině VVN v roce 2004 ( $U_{h3} = 2,4329 \%$ ). V tomto místě na hladině VVN byla 3. harmonická poměrně výrazná ve všech třech analyzovaných letech a to i vzhledem k tomu, že pro hladinu VVN udává norma, i když pouze informativní limitní hodnotu 3 %. Hodnota THD byla nejvyšší na hladině VVN v roce 2011 (THD = 2,415 %). Nejvyšší hodnota  $P_{it}$  vyšla také pro hladinu VVN, ale v roce 2004 ( $P_{it} = 0,2443$ ). Nesymetrie nabývala nejvyšší hodnoty na hladině VN v roce 2004 ( $N = 0,59 \%$ ). Ani v tomto místě nepřekročily 95% ani 100% hodnoty mezní limity. Příslušné grafy jsou přiloženy v příloze č.2.

Tab. 4.3 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 3

		NN				VN				VVN			
		2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma
$U_h$ [%]	3	0,5615	0,4976	0,5064	5,0	0,5329	0,3952	0,4066	5,0	2,4329	2,2917	2,3750	3,0
	5	1,9750	1,0857	1,4289	6,0	1,8145	0,8234	1,2992	6,0	0,3963	0,3683	0,3759	5,0
	7	1,0613	1,3767	1,1525	5,0	0,8000	1,1906	0,9893	5,0	0,2085	0,1583	0,2082	4,0
	9	0,1806	0,1953	0,2680	1,5	0,1005	0,0388	0,0656	1,5	0,0535	0,0681	0,0551	1,3
	11	0,2543	0,3217	0,3475	3,5	0,2166	0,2624	0,2665	3,5	0,1933	0,1582	0,1370	3,0
	13	0,1435	0,1705	0,1846	3,0	0,1295	0,1491	0,1179	3,0	0,1355	0,1571	0,1465	2,5
	15	0,0774	0,1037	0,1075	0,5	0,0656	0,0209	0,0216	0,5	0,0271	0,0398	0,0338	0,5
	17	0,0652	0,0665	0,1040	2,0	0,0912	0,0780	0,0778	2,0	0,0596	0,0901	0,0629	neuvádí
	19	0,0783	0,0738	0,0659	1,5	0,0595	0,0340	0,0418	1,5	0,0333	0,0500	0,0299	neuvádí
	21	0,0334	0,0368	0,0399	0,5	0,0539	0,0143	0,0225	0,5	0,0134	0,0305	0,0206	0,5
	23	0,0455	0,0335	0,0339	1,5	0,0566	0,0360	0,0477	1,5	0,0219	0,0389	0,0563	neuvádí
	25	0,0462	0,0352	0,0290	1,5	0,0724	0,0442	0,0316	1,5	0,0200	0,0354	0,0437	neuvádí
THD [%]		2,0635	1,6164	1,7305	8,0	1,9120	1,3131	1,4596	8,0	2,3678	2,1591	2,4150	neuvádí
$P_{it}$ [-]		0,1841	0,2023	0,1781	1,0	0,2192	0,2000	0,1786	1,0	0,2443	0,2178	0,1942	1,0
$N$ [%]		0,2555	0,4083	0,3504	2,0	0,5900	0,3767	0,3328	2,0	0,4762	0,4008	0,3062	2,0

#### 4.4 Analýza dat z místa 4

Měření proběhla v obdobích od 13.11. do 1.12.2004, od 11.10. do 31.10.2007 a od 9.9. do 22.9.2011. Pro analýzu byly vybrány intervaly od 22.11. do 28.11.2004 (Po-Ne), od 18.10. do 24.10.2007 (Čt-St) a od 12.9. do 18.9.2011 (Po-Ne). Nejvyšší úroveň harmonického napětí vyšla pro 5. harmonickou na hladině VN v roce 2004 ( $U_{h5} = 2,0324 \%$ ). Hodnoty THD,  $P_{it}$  a nesymetrie vyšly nejvyšší pro hladinu VVN v roce 2004 (THD = 2,0405 %,  $P_{it} = 0,2815$  a  $N = 0,7516 \%$ ). Z důvodu opačného sledu fází při měření, chyběla u hladiny NN v roce 2007 hodnota nesymetrie. V tomto místě se opět 95% i 100% hodnoty vešly do limitů daných normou. Příslušné grafy jsou přiloženy v příloze č.3.

Tab. 4.4 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 4

		NN				VN				VVN			
		2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma
$U_h [\%]$	3	0,7252	0,6143	0,5478	5,0	0,3986	0,3313	0,2571	5,0	0,5359	0,3989	0,3334	3,0
	5	1,6318	1,5932	1,4403	6,0	2,0324	1,3200	1,5265	6,0	2,0217	1,0866	1,4154	5,0
	7	0,8830	0,9417	0,7246	5,0	0,3869	0,9884	0,5047	5,0	0,5884	0,7296	0,4274	4,0
	9	0,4757	0,3389	0,4199	1,5	0,0552	0,0279	0,0403	1,5	0,0881	0,0508	0,0478	1,3
	11	0,4521	0,3206	0,5223	3,5	0,2414	0,1847	0,2197	3,5	0,4138	0,3051	0,2746	3,0
	13	0,2282	0,2765	0,2352	3,0	0,2088	0,1746	0,2012	3,0	0,2474	0,2283	0,3662	2,5
	15	0,1438	0,2012	0,1608	0,5	0,0400	0,0329	0,0319	0,5	0,0959	0,0603	0,0636	0,5
	17	0,2441	0,2017	0,2723	2,0	0,0560	0,0608	0,0463	2,0	0,1682	0,1497	0,1691	neuvádí
	19	0,1432	0,1111	0,1714	1,5	0,0486	0,0384	0,0272	1,5	0,0961	0,1125	0,0719	neuvádí
	21	0,0762	0,1157	0,0898	0,5	0,0301	0,0245	0,0208	0,5	0,0735	0,0459	0,0378	0,5
	23	0,1177	0,1092	0,1554	1,5	0,0382	0,0467	0,0580	1,5	0,1160	0,1430	0,2436	neuvádí
	25	0,1157	0,0773	0,0573	1,5	0,0319	0,0410	0,0286	1,5	0,0866	0,1199	0,0819	neuvádí
THD [%]		1,9543	1,9511	1,7426	8,0	2,0153	1,6237	1,5972	8,0	2,0405	1,3491	1,5302	neuvádí
$P_{it} [-]$		0,1618	0,1759	0,1873	1,0	0,1637	0,1722	0,1874	1,0	0,2815	0,1802	0,1950	1,0
$N [\%]$		0,6428	–	0,4224	2,0	0,2542	0,4062	0,4547	2,0	0,7516	0,5327	0,4235	2,0

## 4.5 Analýza dat z místa 5

Měření proběhla v obdobích od 13.11 do 1.12.2004, od 1.11. do 21.11.2007 a od 23.9. do 6.10.2011. Pro analýzu byly vybrány intervaly od 15.11. do 21.11.2004 (Po-Ne), od 5.11. do 11.11.2007 (Po-Ne) a od 26.9. do 2.10.2011 (Po-Ne). Nejvyšší úroveň harmonického napětí vyšla pro 5. harmonickou na hladině VVN v roce 2004 ( $U_{h5} = 2,1255 \%$ ). Hodnoty THD a nesymetrie byly taktéž v této hladině a v tomto roce nejvyšší (THD = 2,1316 % a  $N = 0,7408 \%$ ). Dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{fl}$  vyšla nejvyšší pro hladinu NN v roce 2004 ( $P_{fl} = 0,2209$ ). Stejně jako u čtyřech předchozích míst měření se sledované hodnoty a to jak 95 % tak i 100% s rezervou vešly do limitu daných normou ČSN EN 50160. Příslušné grafy jsou přiloženy v příloze č.4.

Tab. 4.5 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 5

		NN				VN				VVN			
		2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma	2004	2007	2011	norma
$U_h [\%]$	3	0,4463	0,4823	0,4827	5,0	0,4340	0,3596	0,3787	5,0	0,4947	0,4027	0,3826	3,0
	5	1,5876	1,2586	1,0643	6,0	1,8196	0,9617	0,9580	6,0	2,1255	1,0012	0,9450	5,0
	7	1,1369	1,0350	0,7127	5,0	0,6081	0,7302	0,7605	5,0	0,6712	0,4641	0,8580	4,0
	9	0,2684	0,2412	0,2785	1,5	0,0289	0,0329	0,0348	1,5	0,0513	0,0606	0,0449	1,3
	11	0,4901	0,3900	0,3711	3,5	0,2371	0,1871	0,2233	3,5	0,4236	0,2224	0,2533	3,0
	13	0,1683	0,1934	0,2100	3,0	0,0993	0,1246	0,1099	3,0	0,1800	0,2738	0,2860	2,5
	15	0,1216	0,0983	0,1057	0,5	0,0193	0,0232	0,0236	0,5	0,0440	0,0513	0,0456	0,5
	17	0,2285	0,1571	0,1339	2,0	0,0419	0,0492	0,0361	2,0	0,0938	0,0986	0,0852	neuvádí
	19	0,1277	0,1166	0,1206	1,5	0,0251	0,0299	0,0294	1,5	0,0384	0,0643	0,0400	neuvádí
	21	0,0662	0,0580	0,0878	0,5	0,0111	0,0161	0,0152	0,5	0,0134	0,0298	0,0245	0,5
	23	0,0872	0,0781	0,1157	1,5	0,0330	0,0324	0,0293	1,5	0,0220	0,0560	0,0648	neuvádí
	25	0,0630	0,0440	0,0940	1,5	0,0174	0,0184	0,0326	1,5	0,0114	0,0347	0,0519	neuvádí
THD [%]		1,9788	1,6374	1,3397	8,0	1,8455	1,1961	1,1141	8,0	2,1316	1,1386	1,2545	neuvádí
$P_{fl} [-]$		0,2209	0,1950	0,1950	1,0	0,1461	0,1489	0,1617	1,0	0,1595	0,1576	0,1767	1,0
$N [\%]$		0,6117	0,4141	0,3271	2,0	0,4231	0,3792	0,3176	2,0	0,7408	0,4228	0,3549	2,0

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce je zmapování problematiky kvality elektrické energie. Popsání základů elektrických měření. Uvedení požadavků platných norem na kvalitativní parametry elektrické energie. Seznámení s dostupnými technickými prostředky pro monitorování kvality elektrické energie a samozřejmě provedení analýzy dat.

První část této práce je věnována teoretickému rozboru elektrických měření. Zde jsou zmíněny základní pojmy a měřicí metody. Následuje seznámení s chybami a nejistotami měření. V popisu jsou dále zahrnuty měřicí převodníky, virtuální měřicí přístroje, měřicí přístroje s rozhraním a A/D převodníky. Další část je vyhrazena pro popis kvality elektrické energie z pohledu norem ČSN. Je zde uvedena norma ČSN EN 50160 a její požadavky na jednotlivé parametry. Pro doplnění jsou zmíněny i hodnoty z Pravidel provozování distribučních soustav, která přebírají většinu hodnot z této normy, ale uvádí i některé parametry, které u ČSN EN 50160 chybí. Pro porovnání s touto normou je uvedeno i hodnocení harmonických napětí z pohledu norem ČSN EN 61000-2-2 a ČSN EN 61000-2-4. Je potřeba zdůraznit, že norma ČSN EN 61000-2-2, uvádí kompatibilní úroveň pouze pro veřejné distribuční sítě nízkého napětí a norma ČSN EN 61000-2-4 je určena jen pro průmyslové a neveřejné distribuční sítě. Dále jsou popsány zařízení pro monitorování kvality elektrické energie od různých výrobců. Větší prostor je věnován analyzátorům od firmy BK-ELCOM, které byly použity k získání analyzovaných dat. Zmíněny jsou i dva moderní elektroměry, které jsou schopny měřit některé kvalitativní parametry a univerzální měřicí přístroj Meg40.

Praktická část této práce je tvořena analýzou dat, získaných z měření pěti míst na hladinách nn, vn a vvn v letech 2004, 2007 a 2011. Pro analýzu byla zvolena jednotlivá lichá harmonická napětí až do 25. řádu, činitel celkového harmonického zkreslení THD, flikr a nesymetrie. Data jsou vyhodnocena v souladu s normou ČSN EN 50160. Kromě 95% hodnot, které požaduje norma ČSN EN 50160 jsou pro srovnání vykresleny v grafech i 100% hodnoty. Nejvyšší úroveň harmonického napětí vyšla pro 5. harmonickou v místě 1 na hladině NN v roce 2004 ( $U_{h5} = 3,2728 \%$ ). Hodnota THD byla taktéž v tomto místě, hladině napětí a roce nejvyšší (THD = 3,4367 %). Ve většině míst vycházela nejvyšší úroveň harmonického napětí právě pro 5. harmonickou. Jedinou výjimkou bylo místo 3, kde byla na hladině VVN ve všech třech analyzovaných letech nejvýraznější 3. harmonická. Dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{fr}$  byla nejvyšší v místě 2 na hladině VVN v roce 2011 ( $P_{fr} = 0,5066$ ). Hodnota nesymetrie vyšla nejvyšší v místě 4 na hladině VVN v roce 2004 ( $N = 0,7516 \%$ ).

Ze srovnání všech pěti lokalit na jednotlivých napěťových hladinách lze stanovit, že všechny analyzované parametry kvality elektrické energie jsou dlouhodobě udržovány v rámci limitu daných normou. Je nutné podotknout, že i 100% hodnoty tyto limity splnily. Z důvodu velkého množství dat jsou zde vyhodnocena jednotlivá harmonická napětí, THD a flikr jako průměrné hodnoty ze tří fází. Výjimku tvoří místo 2 na hladině VVN v letech 2004 a 2007, kde byla měřena pouze jedna fáze. Vzhledem k tomu, že se hodnoty v jednotlivých fázích od sebe výrazněji nelišily a také díky toho, že se všechny analyzované parametry s rezervou vešly do stanovených limitů, lze si toto zjednodušení dovolit.



Problematicke kvality elektrické energie se bude potřeba věnovat i v budoucnu. Zvyšují se požadavky uživatelů na kvalitu dodávané elektrické energie a stále více faktorů ji negativně ovlivňuje. Je to dáno hlavně narůstajícím množstvím nelineárních spotřebičů způsobujících harmonické a také poruchovými stavy. Lze očekávat, že výrobci prostředků pro monitorování kvality elektrické energie přijdou s rychlejšími, přesnějšími a dostupnějšími zařízeními. Z těchto důvodů mohu usoudit, že kvalitativní stránka elektrické energie a s ní spojené měření a následné vyhodnocování bude nabývat stále více na významu.

## Literatura

- [1.] HAASZ, Vladimír; SEDLÁČEK, Miloš. *Elektrická měření - Přístroje a metody*. Dotisk 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 327 s. ISBN 80-01-01717-6
- [2.] FAJT, Václav; HAASZ, Vladimír; SEDLÁČEK Miloš. *Elektrická měření*. Dotisk 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996. 237 s. ISBN 80-01-00751-0
- [3.] BIČOVSKÁ, Blanka. *Elektrická měření*. Ostrava: VŠB-TUO, 2007. 97 s. Skriptum.
- [4.] DRECHSLER, Richard. *Měření elektrické energie*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966. 412 s.
- [5.] HEŘMAN, Josef a kol. *Příručka silnoprůdové elektrotechniky*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1986. 1032 s.
- [6.] ŽÍDEK, Jan. *Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW*. Ostrava: VŠB-TUO, 2002. 215 s. Skriptum.
- [7.] NOVÁK, Ondřej; NOUZA, Jan; DOLEŽAL, Ivan; KOLÁŘ, Milan. *Elektronika*. 2. vyd. Liberec: TUL, 2004. 178 s. ISBN 80-7083-792-6
- [8.] ČSN EN 50160 ed. 3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 32 s. Třídící znak 33 0122
- [9.] Provozovatelé distribučních soustav. *Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 3: Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení* [online]. 2011. 43 s. [cit. 2012-2-7]. Dostupné z: [http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011\\_priloha-3.pdf](http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf)
- [10.] ČSN EN 61000-2-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 2-2: Prostředí – Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných sítích nízkého napětí*. Praha: Český normalizační institut. 2003. 28 s. Třídící znak 33 3432
- [11.] ČSN EN 61000-2-4 ed. 2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 2-4: Prostředí – Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením v průmyslových závodech*. Praha: Český normalizační institut. 2003. 35 s. Třídící znak 33 3432
- [12.] Universal Serial Bus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2011-11-19]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Serial\\_Bus](http://cs.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus)
- [13.] A/D převodník. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/A/D\\_p%C5%99evodn%C3%ADk](http://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk)

- [14.] Distribuovaný systém monitoringu kvality elektřiny [online]. [cit. 2012-02-11]. Dostupné z: <http://www.elcom.cz/virtualni-instrumentace/produkty/bk-elcom2/clanek/429-distribuvany-system.html>
- [15.] ŽÍDEK, Jan. *Monitoring a analýza kvality elektřiny* [online]. 13 s. [cit. 2012-02-11]. Dostupné z: [http://www.elcom.cz/files.php?id=/4/download/bk-elcom/monitoring\\_a\\_analyza\\_kvality\\_elektriny.pdf](http://www.elcom.cz/files.php?id=/4/download/bk-elcom/monitoring_a_analyza_kvality_elektriny.pdf)
- [16.] Uživatelský manuál. *BK-ELCOM Komplexní systém monitoringu a analýzy kvality elektřiny – Uživatelský manuál BK-Measure – Měření* [online]. 2008. 119 s. [cit. 2012-02-10]. Dostupné z: <http://www.elcom.cz/files.php?id=/4/download/bk-elcom/BK-MEASURE.pdf>
- [17.] Firemní literatura Fluke [online]. [cit. 2012-02-20]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/Fluke/czcs/products/Pomucky-pro-kvalitu-site.htm>
- [18.] Dokumentace. *Fluke 435-II – Třífázový analyzátor elektrických sítí* [online]. [cit. 2012-02-20]. Dostupné z: <http://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/analyzatory/fluke435.html>
- [19.] Dokumentace. *Fluke 1760 Topas – Třífázový záznamník kvality elektrické energie* [online]. [cit. 2012-02-20]. Dostupné z: <http://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/analyzatory/fluke-1760-topas.html>
- [20.] Firemní literatura Chauvin Arnoux [online]. [cit. 2012-02-23]. Dostupné z: [http://www.chauvin-arnoux.com/produit/famille\\_liste.asp?idRub=1394&idpole=1](http://www.chauvin-arnoux.com/produit/famille_liste.asp?idRub=1394&idpole=1)
- [21.] Dokumentace. *C.A 8335 Qualistar Plus – Třífázový analyzátor elektrických sítí* [online]. [cit. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/analyzatory/ca8335.html>
- [22.] Dokumentace. *C.A 8352 – Třífázový analyzátor elektrických sítí* [online]. [cit. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/analyzatory/ca8352.html>
- [23.] Uživatelská příručka. *Univerzální monitor MEgA MEg40* [online]. 2010. 44 s. [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: [http://www.e-mega.cz/doc/2010/meg40\\_2010\\_09.pdf](http://www.e-mega.cz/doc/2010/meg40_2010_09.pdf)
- [24.] Firemní literatura. *Landis+Gyr E850 ZMQ200* [online]. [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: [http://www.landisgyr.com/cz/cz/pub/produkty\\_a\\_eeni.cfm?eventProducts=products.CategoryProducts&catID=10](http://www.landisgyr.com/cz/cz/pub/produkty_a_eeni.cfm?eventProducts=products.CategoryProducts&catID=10)
- [25.] Dokumentace. *Itron ACE8000* [online]. [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://www.itron.cz/cs/download/ace8000.pdf>

## Seznam obrázků

Obr. 1.1 Příklad zapojení bočníku do obvodu.....	10
Obr. 1.2 Příklady zapojení děliče napětí .....	12
Obr. 1.3 Zapojení měřicího transformátoru proudu .....	13
Obr. 1.4 Zapojení měřicího transformátoru napětí.....	14
Obr. 1.5 Fyzická podoba VXI měřicího systému.....	17
Obr. 1.6 Paralelní A/D převodník .....	19
Obr. 1.7 A/D převodník s postupnou aproximací .....	20
Obr. 1.8 A/D převodník s dvojí integrací.....	21
Obr. 1.9 A/D převodník se schodovitým napětím.....	21
Obr. 2.1 Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech $U_N$ pro nn a $U_c$ pro vn veřejné distribučních sítě. ....	27
Obr. 3.1 Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA400.....	33
Obr. 3.2 Analyzátor BK-ELCOM v provedení a) ENA500.12 a b) ENA500.13 .....	34
Obr. 3.3 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA560 .....	34
Obr. 3.4 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA600 .....	35
Obr. 3.5 Analyzátor Fluke 435 řady II.....	36
Obr. 3.6 Analyzátor Fluke 1760 Topas .....	37
Obr. 3.7 Analyzátor C.A 8335 QUALISTAR PLUS .....	37
Obr. 3.8 Analyzátor C.A 8352 .....	38
Obr. 3.9 Univerzální monitor MEgA MEg40 .....	39
Obr. 3.10 Elektroměr Landis+Gyr E850 ZMQ200.....	39
Obr. 3.11 Elektroměr Itron ACE8000.....	40
Obr. 4.1 Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 1 v roce 2004 .....	42
Obr. 4.2 Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 1 v roce 2007 .....	42
Obr. 4.3 Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 1 v roce 2011 .....	42
Obr. 4.4 Hodnoty $P_{lr}$ , THD a nesymetrie pro místo 1 v roce 2004 .....	43
Obr. 4.5 Hodnoty $P_{lr}$ , THD a nesymetrie pro místo 1 v roce 2007 .....	43
Obr. 4.6 Hodnoty $P_{lr}$ , THD a nesymetrie pro místo 1 v roce 2011 .....	43

## Seznam tabulek

Tab. 1.1 Chyby pro základní matematické operace .....	7
Tab. 2.1 Mezní hodnoty odchylek napájecího napětí podle PPDS .....	23
Tab. 2.2 Mezní hodnoty velikosti rychlých změn napětí podle PPDS .....	24
Tab. 2.3 Úrovně jednotlivých harmonických napětí pro sítě nn a vn v předávacím místě v procentech $u_i$ pro řády harmonických až do 25 .....	25
Tab. 2.4 Informativní hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro sítě vvn v předávacím místě v procentech $u_i$ pro řády harmonických až do 25 .....	26
Tab. 2.5 Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nn .....	28
Tab. 2.6 Kompatibilní úrovně pro harmonické lichého řádu mimo násobku tří .....	30
Tab. 2.7 Kompatibilní úrovně pro harmonické lichého řádu, které jsou násobkem tří .....	30
Tab. 2.8 Kompatibilní úrovně pro harmonické složky napětí sudého řádu .....	30
Tab. 2.9 Kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení .....	30
Tab. 4.1 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 1 .....	41
Tab. 4.2 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 2 .....	44
Tab. 4.3 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 3 .....	45
Tab. 4.4 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 4 .....	46
Tab. 4.5 Vyhodnocené a mezní hodnoty pro místo 5 .....	47

## **Seznam příloh**

Příloha č.1: Grafy pro analýzu dat z místa 2

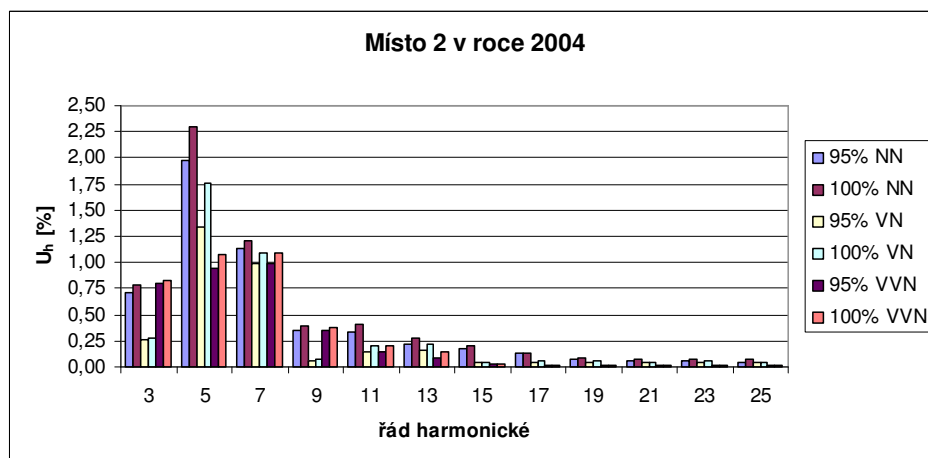
Příloha č.2: Grafy pro analýzu dat z místa 3

Příloha č.3: Grafy pro analýzu dat z místa 4

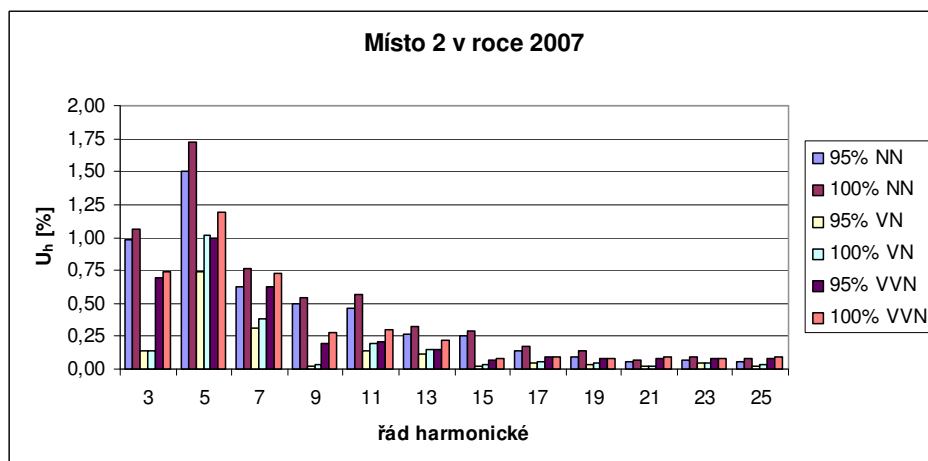
Příloha č.4: Grafy pro analýzu dat z místa 5

## Příloha č.1: Grafy pro analýzu dat z místa 2

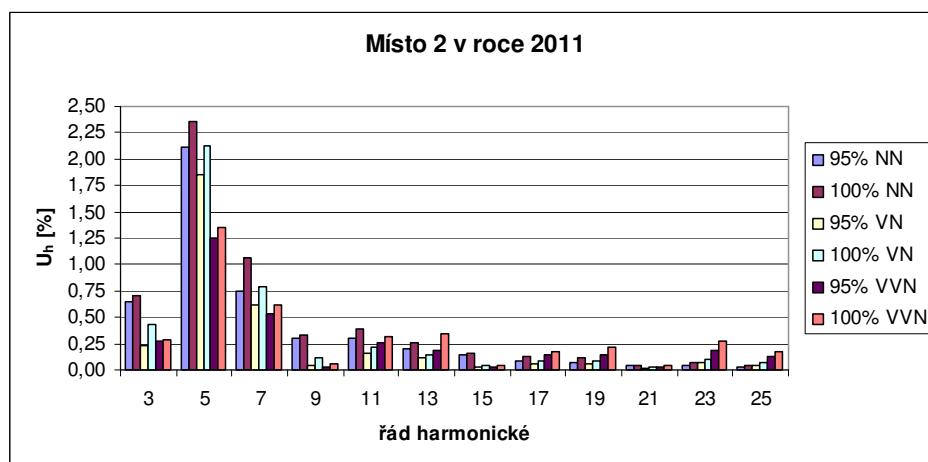
Graf 1.1 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 2 v roce 2004



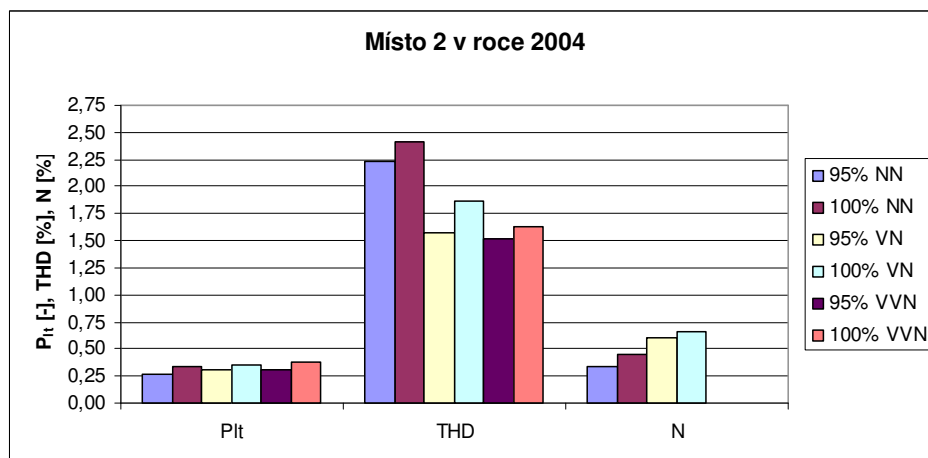
Graf 1.2 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 2 v roce 2007



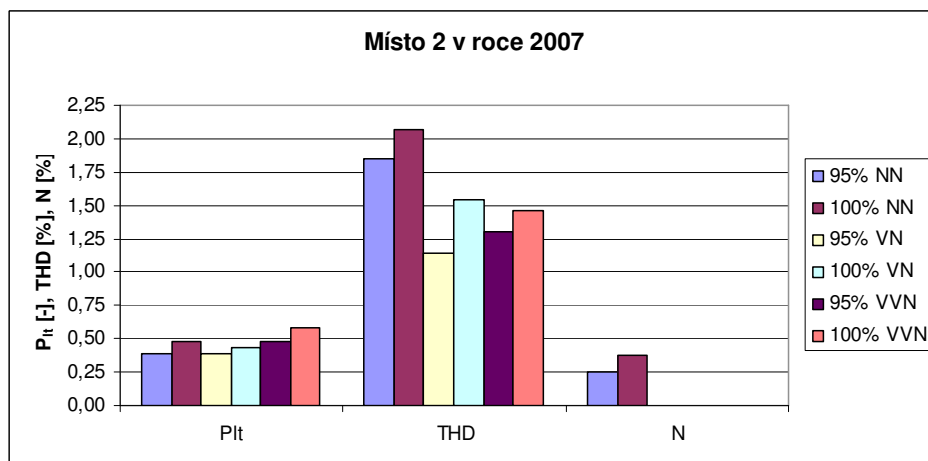
Graf 1.3 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 2 v roce 2011



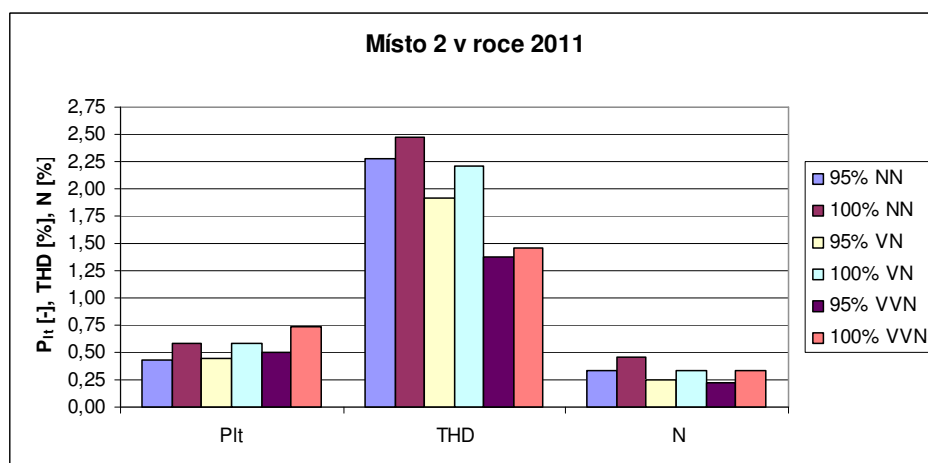
Graf 1.4 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 2 v roce 2004



Graf 1.5 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 2 v roce 2007



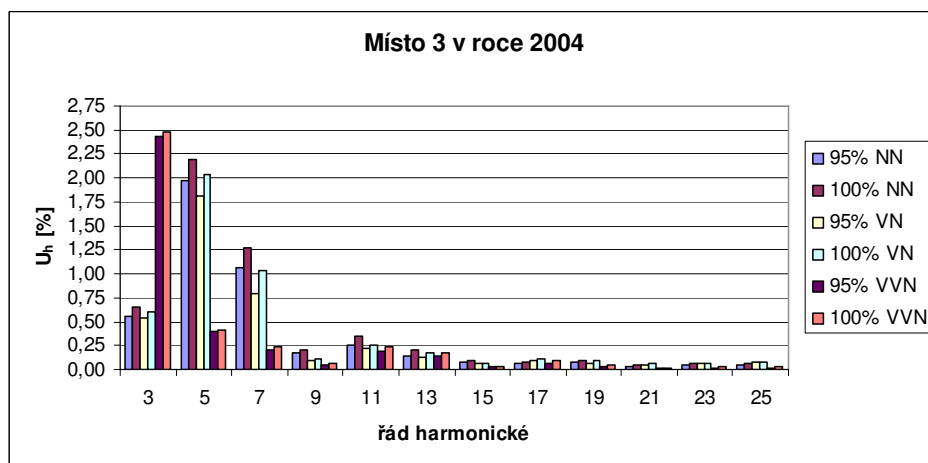
Graf 1.6 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 2 v roce 2011



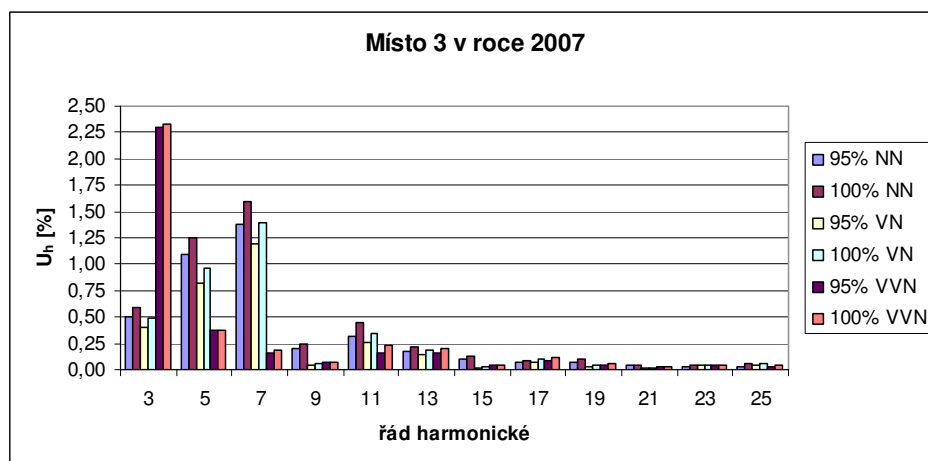


## Příloha č.2: Grafy pro analýzu dat z místa 3

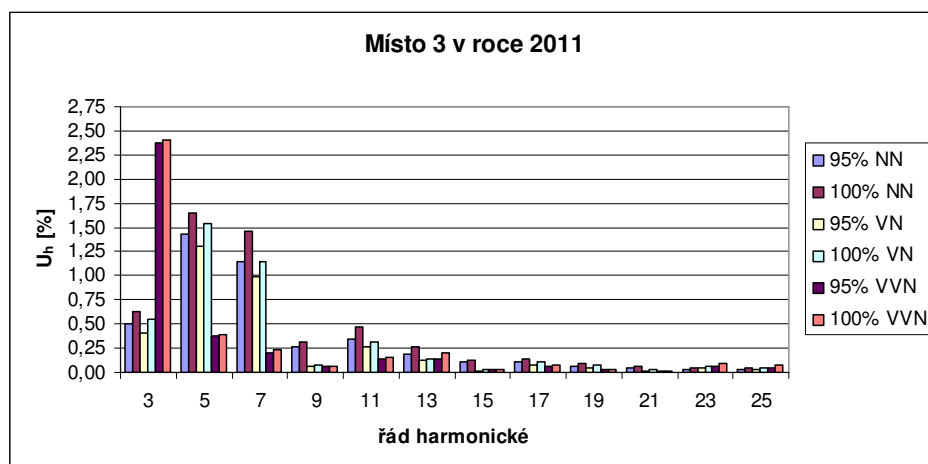
Graf 2.1 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 3 v roce 2004



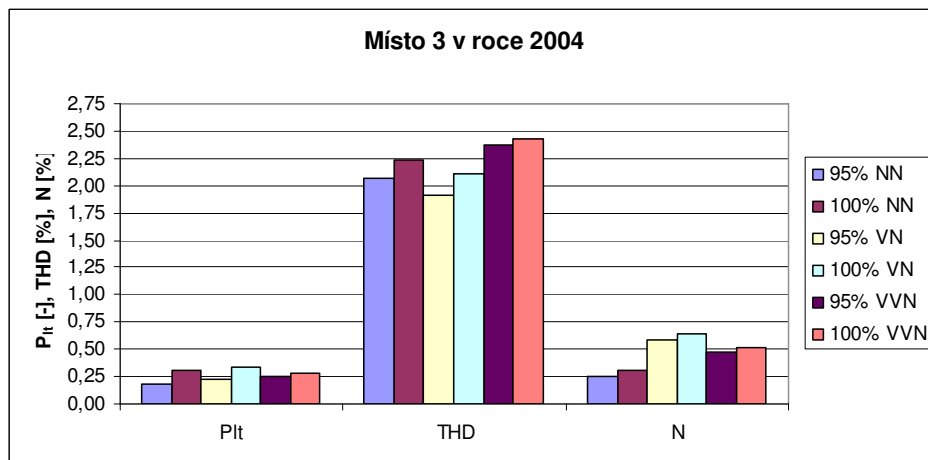
Graf 2.2 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 3 v roce 2007



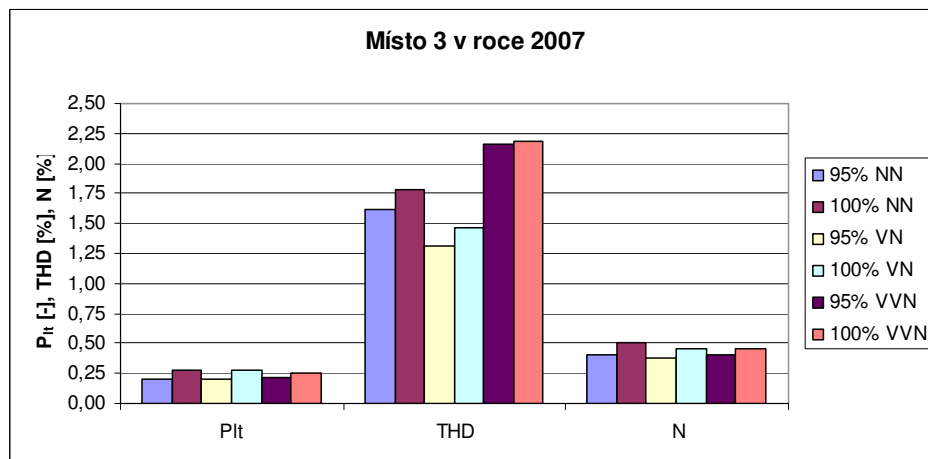
Graf 2.3 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 3 v roce 2011



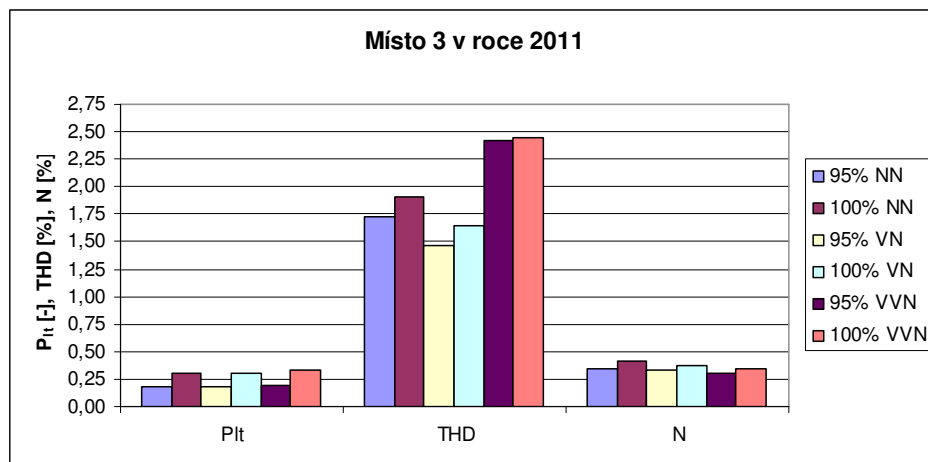
Graf 2.4 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 3 v roce 2004



Graf 2.5 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 3 v roce 2007

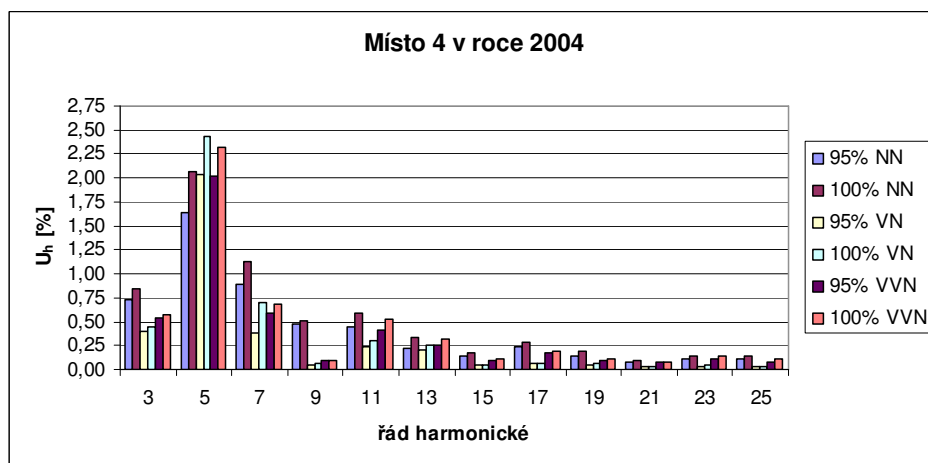


Graf 2.6 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 3 v roce 2011

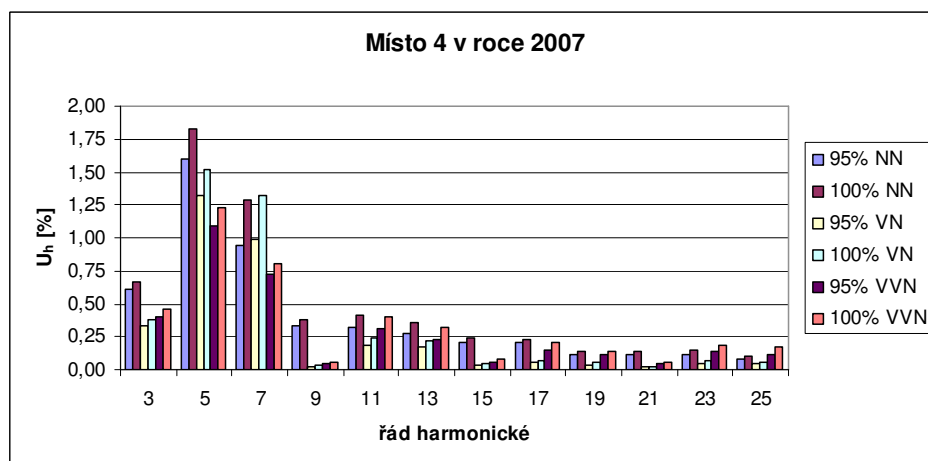


### Příloha č.3: Grafy pro analýzu dat z místa 4

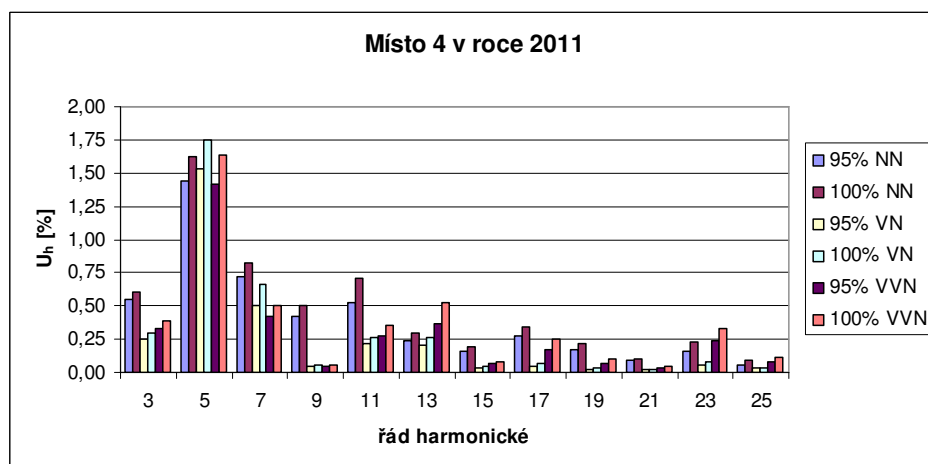
Graf 3.1 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 4 v roce 2004



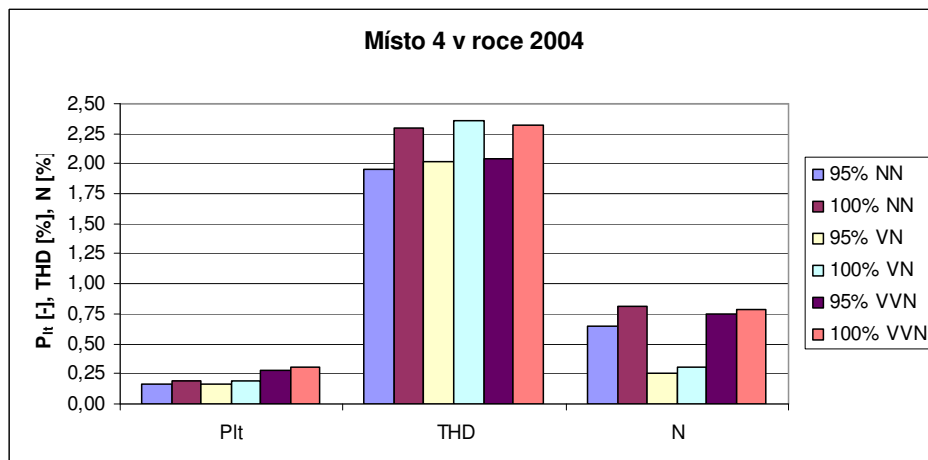
Graf 3.2 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 4 v roce 2007



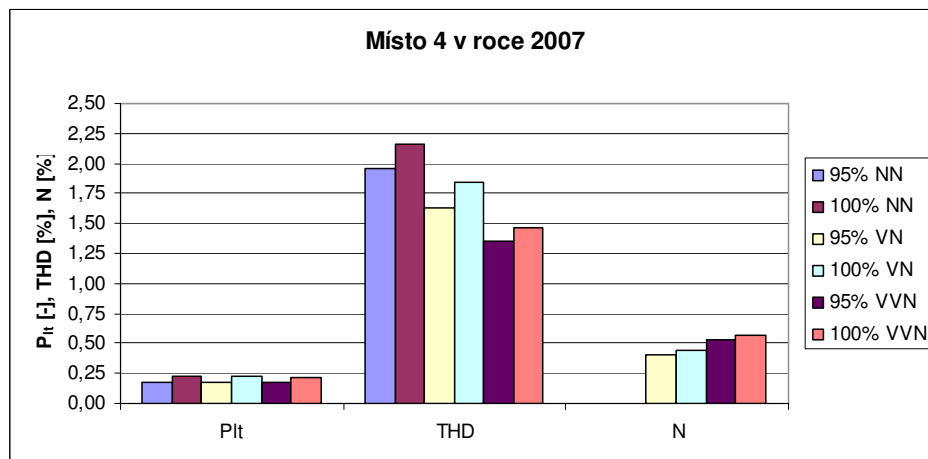
Graf 3.3 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 4 v roce 2011



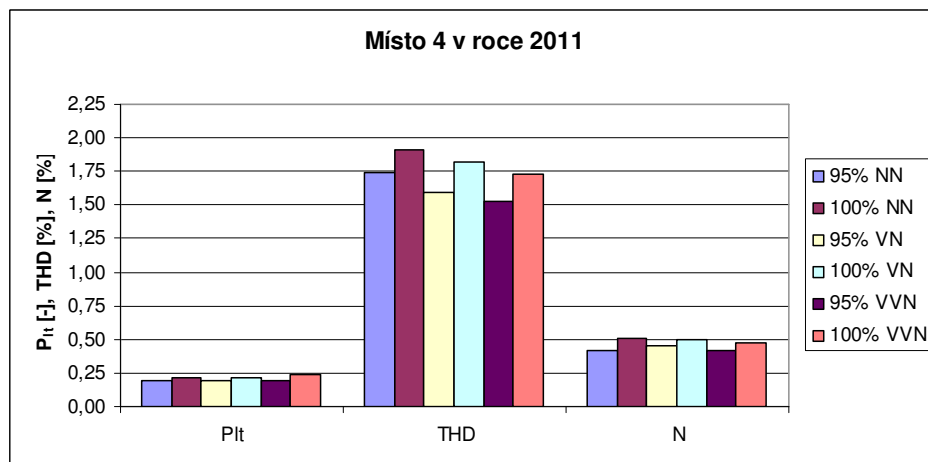
Graf 3.4 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 4 v roce 2004



Graf 3.5 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 4 v roce 2007

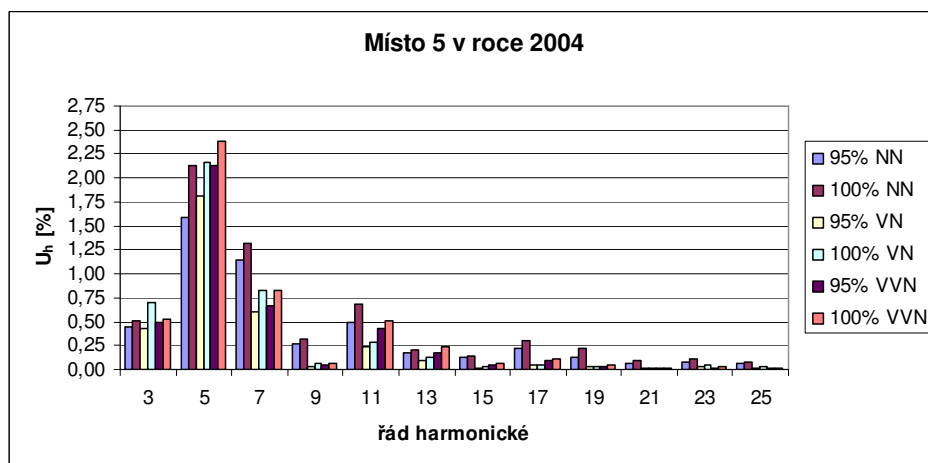


Graf 3.6 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 4 v roce 2011

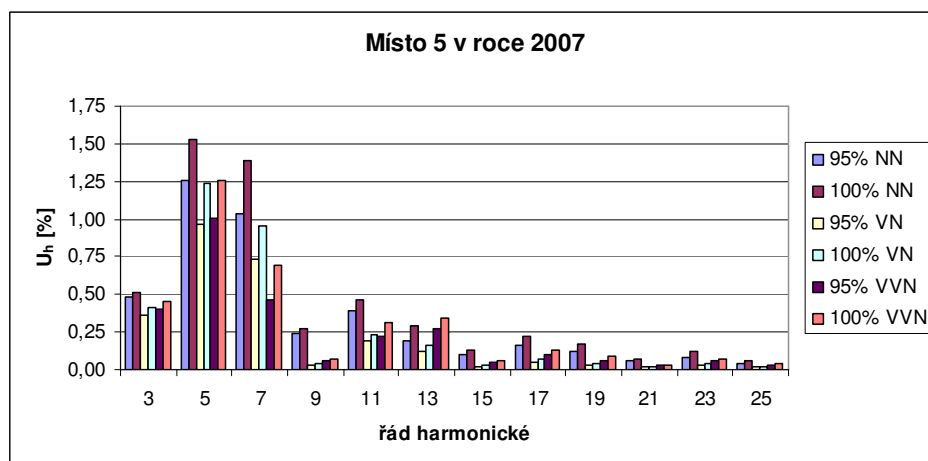


#### Příloha č.4: Grafy pro analýzu dat z místa 5

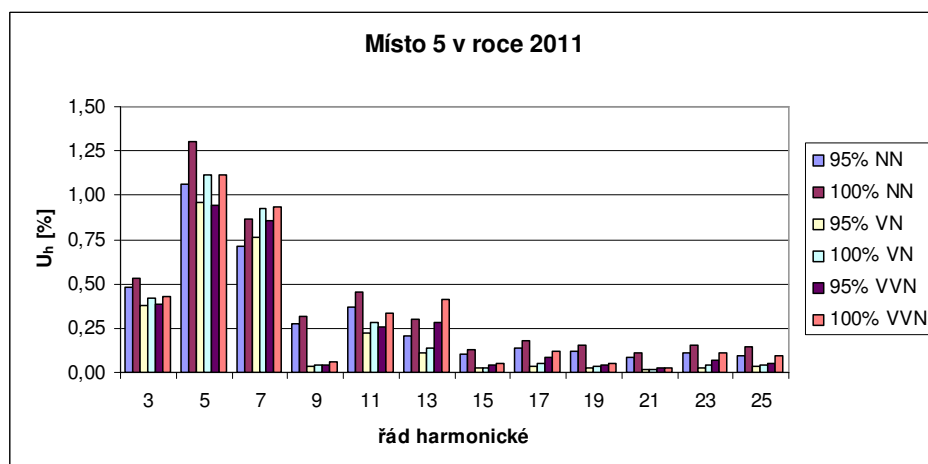
Graf 4.1 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 5 v roce 2004



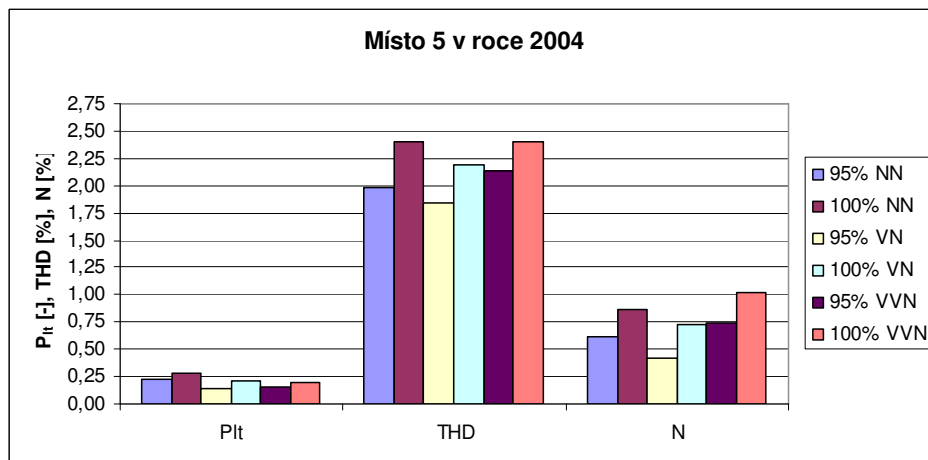
Graf 4.2 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 5 v roce 2007



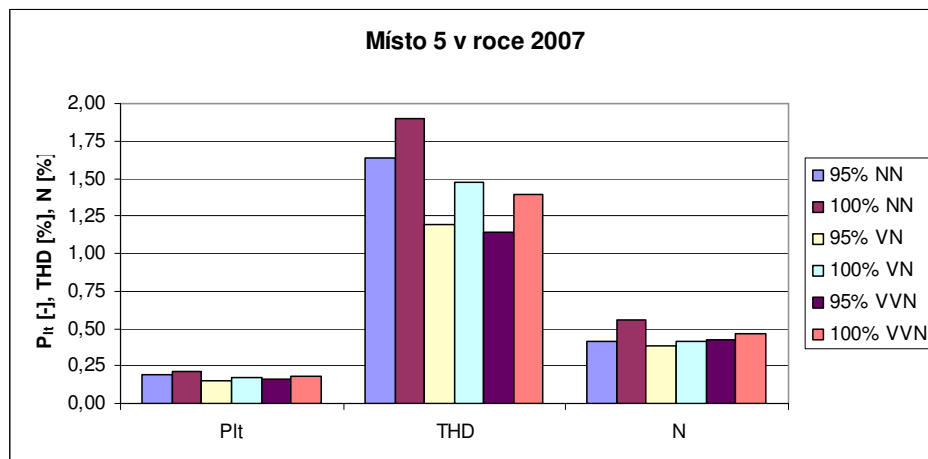
Graf 4.3 – Hodnoty jednotlivých harmonických napětí pro místo 5 v roce 2011



Graf 4.4 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 5 v roce 2004



Graf 4.5 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 5 v roce 2007



Graf 4.6 – Hodnoty Plt, THD a nesymetrie pro místo 5 v roce 2011

